

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Napět'ová a deformační analýza  
cyklistické přilby nového typu**

Strength and Stress Analysis  
of New Desigh of Cycling Helmet

Student:

Petr Lakomý

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Milada Hlaváčková, Ph.D.

## Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Lakomý**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika  
Téma: **Napět'ová a deformační analýza cyklistické přilby nového typu**  
**Strength and Stress Analysis of New Design of Cycling Helmet**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Provedení rešerší stávajících konstrukčních a materiálových řešení a norem včetně metod testování cyklistických přileb.
2. Provedení napět'ové a deformační analýzy nového typu cyklistické přilby.
3. Zhodnocení návrhu z hlediska výsledků analýzy.
4. Návrh konstrukčních úprav v případě nevyhovujících výsledů pevnostní kontroly.

Seznam doporučené odborné literatury:

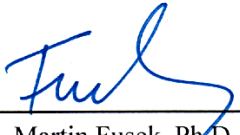
- [1] Kolář V., Němec I., Kanický V.: FEM Principy a praxe metody konečných prvků. Computer Press, 1977, ISBN 80-722-6021-9
- [2] Hoschl C.: Pružnost a pevnost ve strojnictví, SNTL/Alfa, Praha, 1971
- [3] Cook, R.d. Finite Element Modeling for Stress Analysis. 1st edition. New York. Wiley & Sons, 1995. 320 s ISBN 0-471-10774-3

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milada Hlaváčková, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci, včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Lukáš', written over a horizontal dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen autorský zákon), zejména § 35 (užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucí práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019.



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Petr Lakomý

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sportovní 252, 789 91, Štítý

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí bakalářské práce, Ing. Miladě Hlaváčkové, Ph.D., za věnovaný čas a věcné připomínky, kterými přispěla k vypracování této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Maršálkovi, Ph.D., který mi byl vždy ochoten poskytnout cenné rady z oblasti metody konečných prvků.

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LAKOMÝ, P. *Napěťová a deformační analýza cyklistické přilby nového typu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2019, 71 s. Vedoucí práce: Hlaváčková, M.

Tato bakalářská práce se zabývá výpočetní analýzou cyklistické přilby nového typu. V první části této práce jsou uvedeny všeobecné informace týkající se současných cyklistických přileb. Uvedeny jsou zejména jejich technologická, materiálová a konstrukční řešení, ale i rešerše z norem, kterým podléhají. Další část je již věnována konstrukčním úpravám nového typu cyklistické přilby. Upravená konstrukce umožnila významně zredukovat hmotnost a parametrizovat geometrii ovlivňující mechanické vlastnosti přilby. Poslední část se zabývá napěťovou a deformační analýzou zjednodušeného výpočetního modelu cyklistické přilby. Deformační chování bylo také porovnáno s experimentálními výsledky konvenční přilby.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

LAKOMÝ, P. *Strength and Stress Analysis of New Design of Cycling Helmet: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2019, 71 s. Thesis head: Hlaváčková, M.

This bachelor thesis deals with a computational analysis of a new type of cycling helmet. The first part of this thesis includes general information about current cycling helmets. Mentioned in particular are their technological, material and construction solutions, as well as background research about the standards which they are subject to. The subsequent part focuses on structural modifications of a new type of cycling helmet. This modified design has made it possible to significantly reduce the overall weight and parameterize the geometry affecting the helmet's mechanical properties. The final part deals with the stress and strain analysis of the simplified computational model of the cycling helmet. The deformational behaviour was also compared to the experimental results of a conventional helmet.

# Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	9
Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	12
Úvod .....	13
1. Stávající cyklistické přilby .....	15
1.1 Konstrukční řešení .....	16
1.2 Použitelné materiály .....	17
1.3 Technologie zpracování .....	22
2. Normy .....	23
2.1 ČSN EN 960 .....	23
2.2 ČSN EN 1078+A1 .....	29
3. Biomechanika kranio cerebrálního poranění .....	38
3.1 Difuzní axonální poranění .....	40
4. Designový návrh nové cyklistické přilby .....	41
4.1 Oprava původní vnější skořepiny .....	42
4.2 Vytvoření nové vnější skořepiny .....	45
5. Výpočtový model nové cyklistické přilby .....	46
5.1 Zjednodušený výpočtový model skořepiny .....	46
5.2 Výpočtový model vnitřní struktury .....	48
6. Výpočtová analýza nové cyklistické přilby .....	56
6.1 Materiálové vlastnosti a okrajové podmínky .....	56
6.2 Deformační analýza nové cyklistické přilby .....	58
6.3 Vyhodnocení deformačního posunutí .....	59
6.4 Napěťová analýza nové cyklistické přilby .....	61
6.5 Vyhodnocení napětí .....	63
7. Přibližná hmotnost nové cyklistické přilby .....	66

8.	Závěr.....	67
9.	Seznam použité literatury .....	69
10.	Zvláštní příloha .....	71



# Seznam použitých značek a symbolů

ABS	akrylonitrilbutadienstyren
DAP	difuzní axonální poranění
EPS	expandovaný polystyren
HMH	Huber-Mises-Hencky
KC(P)	kraniocerebrální (poranění)
PA	polyamid
TPU	termoplastický polyuretan
UV	ultrafialové (z anglického ultraviolet)

# Seznam obrázků

<b>Obrázek 1.1</b> – Hlavní části cyklistické přilby .....	16
<b>Obrázek 1.2</b> – Závislost napětí na poměrném stlačení .....	18
<b>Obrázek 1.3</b> – Ashbyho mapa materiálů vhodných k tlumení nárazů.....	19
<b>Obrázek 1.4</b> – Ashbyho mapa materiálů vhodných k výrobě tlumící vložky přileb .....	20
<b>Obrázek 1.5</b> – Materiálová mapa pevnost – houževnatost .....	21
<b>Obrázek 1.6</b> – Zleva technologie in-mold, hardshell (glue-on) a hardshell (tape-on).....	22
<b>Obrázek 2.1</b> – Řez vertikální podélnou rovinou makety hlavy .....	25
<b>Obrázek 2.2</b> – Vytvořená částečná geometrie makety hlavy .....	27
<b>Obrázek 2.3</b> – Zkušební zařízení pro zkoušení účinnosti upevňovacího systému .....	31
<b>Obrázek 2.4</b> – Zkušební zařízení pro zkoušení pevnosti upevňovacího systému .....	33
<b>Obrázek 2.5</b> – Definování zkušebních oblastí .....	34
<b>Obrázek 2.6</b> – Zkušební zařízení pro stanovení schopnosti přilby tlumit náraz .....	35
<b>Obrázek 3.3</b> – Mechanismus par contre-coup .....	38
<b>Obrázek 3.2</b> – Vznik lineárních fraktur vlivem nárazu na velkou kontaktní plochu .....	38
<b>Obrázek 3.1</b> – Otevřené poranění v důsledku poranění malým ostrým předmětem .....	38
<b>Obrázek 3.5</b> – Translační akcelerace způsobující pohyb hlavy zepředu dozadu .....	39
<b>Obrázek 3.4</b> – Rotační akcelerace způsobující protichůdný pohyb mozku a kalvy .....	39
<b>Obrázek 3.6</b> – technologie MIPS.....	40
<b>Obrázek 4.1</b> – Konečný design cyklistické přilby navržené Bc. Matějem Martínkem .....	41
<b>Obrázek 4.2</b> – Vnitřní struktura navržená Bc. Matějem Martínkem .....	41
<b>Obrázek 4.3</b> – Problémové „nesešité“ oblasti modelu .....	42
<b>Obrázek 4.5</b> – Neřešený přechod mezi zaoblením horní a prostřední částí přilby .....	43
<b>Obrázek 4.4</b> – Neřešený přechod mezi zaoblením prostřední a spodní částí přilby.....	43
<b>Obrázek 4.6</b> – Opravená původní vnější skořepina .....	43
<b>Obrázek 4.7</b> – Řez v rovině symetrie původní přilby, přední část .....	44
<b>Obrázek 4.9</b> – Řez přední částí upravené skořepiny .....	45
<b>Obrázek 4.8</b> – Řez zadní částí upravené skořepiny .....	45
<b>Obrázek 5.1</b> – Vliv větracích otvorů na tvorbu sítě.....	46
<b>Obrázek 5.2</b> – Render výpočtového modelu vnější skořepiny .....	47
<b>Obrázek 5.3</b> – Vysíťovaný výpočtový model vnější skořepiny .....	47
<b>Obrázek 5.4</b> – Výpočtový model skořepiny s částečnou maketou hlavy .....	48
<b>Obrázek 5.5</b> – Výpočtový model skořepiny s vnitřní strukturou .....	49

<b>Obrázek 5.6</b> – Mřížková struktura vytištěná z TPU .....	49
<b>Obrázek 5.7</b> – Aplikace okrajových podmínek na kvádr z tetraedrické mřížky .....	50
<b>Obrázek 5.8</b> – Prodloužení výpočtového modelu kvádru ve směru namáhání .....	52
<b>Obrázek 5.9</b> – Zúžení výpočtového modelu kvádru ve směru kolmém na namáhání.....	52
<b>Obrázek 5.10</b> – Prodloužení kvádru z tetraedrické mřížky ve směru namáhání .....	53
<b>Obrázek 5.11</b> – Zúžení kvádru z tetraedrické mřížky ve směru kolmém na namáhání .....	53
<b>Obrázek 5.12</b> – Složitá vnitřní struktura z tetraedrické mřížky.....	54
<b>Obrázek 5.13</b> – Zjednodušený výpočtový model vnitřní struktury .....	54
<b>Obrázek 6.1</b> – Okrajové podmínky výpočtového modelu nové cyklistické přilby .....	57
<b>Obrázek 6.2</b> – Deformační posunutí modelu.....	58
<b>Obrázek 6.3</b> – Detailní pohled na maximální deformační posunutí modelu .....	58
<b>Obrázek 6.4</b> – Deformační posunutí přilby při zatížení 500 N z experimentu Bc. Ondřeje Hurníka .....	59
<b>Obrázek 6.5</b> – Napětí ve skořepině dle teorie HMM .....	61
<b>Obrázek 6.6</b> – Napětí uvnitř zjednodušené vnitřní struktury .....	62
<b>Obrázek 6.7</b> – Maximální možné zatížení tetraedrické mřížky.....	64
<b>Obrázek 6.8</b> – Detail maximálního napětí tetraedrické mřížky.....	64

# Seznam tabulek

<b>Tabulka 2.1</b> – Tabulka rozměrů maket hlavy a hmotností .....	25
<b>Tabulka 2.2</b> – Polární souřadnice pro celkovou maketu hlavy velikosti 445 .....	26
<b>Tabulka 2.3</b> – Velikosti maket hlavy pro zkoušky .....	29
<b>Tabulka 2.4</b> – Pořadí zkoušek a zkoušky na zkušebních vzorcích .....	30
<b>Tabulka 2.5</b> – Parametry zkoušek .....	36
<b>Tabulka 6.1</b> – Materiálové vlastnosti vnitřní struktury .....	56
<b>Tabulka 6.2</b> – Materiálové vlastnosti skořepiny .....	56
<b>Tabulka 6.3</b> – Geometrické okrajové podmínky .....	57
<b>Tabulka 6.4</b> – Silové okrajové podmínky .....	57
<b>Tabulka 6.5</b> – Materiálové vlastnosti vnitřní pěnové vložky .....	60
<b>Tabulka 6.6</b> – Materiálové vlastnosti skořepiny .....	60
<b>Tabulka 6.7</b> – Materiálové vlastnosti výztuhy .....	60

# Úvod

Odborné výrazy byly čerpány z literatury [01] a [02].

Cílem této bakalářské práce bylo navázání na dosavadní designový návrh cyklistické SMART přilby, která vznikla ve spolupráci studenta Bc. Matěje Martínka s firmou Invent Medical Group, s. r. o. Tato firma se zabývá vývojem protetických a ortetických high-tech zdravotnických pomůcek, např. dětských kraniálních<sup>1</sup> ortéz napravujících polohové deformity lebky. Výroba těchto zdravotnických pomůcek na míru probíhá zejména prostřednictvím 3D tisku.

Zázemí této firmy poskytuje veškeré technologie i pro vývoj sportovních helem nového typu. Pomocí 3D tisku by mohlo být dosaženo takové vnitřní struktury helmy na míru, která by poskytovala dokonalé přilnutí k hlavě. Tím lze získat jednak komfort při nošení, ale hlavně lepší ustavení helmy v průběhu nárazu. Volitelnost geometrie vnitřní struktury helmy by umožňovala dosáhnout libovolné poddajnosti ve volitelných místech a směrech helmy při zachování vnějšího designu. Takto by došlo ke zmírnění vzniku kontuzí<sup>2</sup> mozku a alespoň elementárnímu zmírnění difúzního axonálního poranění<sup>3</sup>, které často vede k fatálnímu poškození mozku bez výhledu na rekonvalescenci. Proto i malé zlepšení ve zmírnění DAP znamená velké posunutí směrem k bezpečnějším přilbám.

První kapitola bakalářské práce je věnována obecně stávajícím cyklistickým přilbám, definici vymezující, co je cyklistická přilba a její využití. Dále jsou uvedeny konstrukční, materiálová a technologická řešení dosavadních přileb a také české verze evropských norem, kterým tyto přilby podléhají. Z normy ČSN EN 1078+A1 je uveden výtah, zejména z kapitoly zabývající se stanovením schopnosti helmy tlumit náraz.

Následující kapitola je doplněna o rešerši z oblasti biomechaniky. Jde o rešerši kraniocerebrálního poranění<sup>4</sup> se zaměřením na již zmíněné vážné DAP, neboť dosavadní přilby tomuto mechanismu poškození mozku většinou nezabraňují – přesto zůstává otázkou, do jaké míry vůbec lze zabránit DAP použitím ochranné přilby.

---

<sup>1</sup> kraniální – lebeční [1, str. 410]

<sup>2</sup> kontuze mozku – zhmoždění mozku způsobení kontaktním mechanismem [1, str. 402], [2, str. 34]

<sup>3</sup> Difúzní axonální poranění (dále jako DAP) – vlivem akceleračních a deceleračních mechanismů vzniká postižení axonů či dokonce přetržení cév, v současné době je např. i komoce (otřes mozku) chápán jako nejnížší stupeň difúzního axonálního poranění. [2. str. 34]

<sup>4</sup> kraniocerebrální poranění (dále jako KCP) – týkající se lebky a mozku. [1, str. 410]

Další kapitoly jsou již věnovány praktické části. Jak již bylo zmíněno, cílem bylo navázat na dosavadní designový návrh konkrétní cyklistické přilby studenta Bc. Matěje Martínka ve spolupráci s firmou Invent Medical Group, s. r. o. Pro stejnojmennou firmu byly navrženy úpravy tohoto designu a vytvořen výpočtový model této přilby pro následné napěťové a deformační analýzy.

# 1. Stávající cyklistické přilby

V této kapitole bylo čerpáno z literatury [02], [03], [04], [05] a [06].

I přes značný pokrok ve zdravotnictví, zůstávají statistické ukazatele morbidity a mortality v oblasti mozkových poranění značně vysoké. Tím je potvrzena léčebná obtížnost a v častých případech až nemožnost rekonvalescence.

KCP je obzvláště závažné v dětském věku, kdy tato poranění mohou s velkou pravděpodobností negativně ovlivnit další vývoj fyzického růstu a také psychických a mentálních schopností zraněného dítěte. V důsledku zranění lze předpokládat zvýšení rizika ztráty nadání a budoucích pracovních schopností. Finanční náklady vynaložené na akutní i chronickou péči, rehabilitaci a různé reedukační programy jsou enormní. Je tedy pochopitelné, že v posledních letech je kladen důraz hlavně na prevenci těchto úrazů.

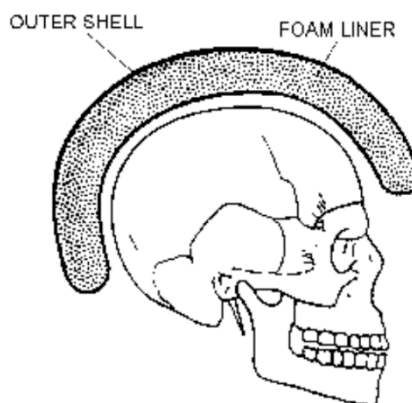
Ze studií, byl statisticky prokázán význam přileb u motocyklistů a bicyklistů, kdy jejich použitím bylo sníženo riziko poranění mozku až o 85 % [2, str. 28]. Z těchto důvodů jsou v mnoha zemích, včetně České republiky, cyklisté mladší 18 let povinni za jízdy použít ochranou přilbu schváleného typu, která musí být zároveň i řádně nasazena a připevněna na hlavě.

Cyklistická přilba je tedy přilba, kterou nosí cyklisté při jízdě na kole za účelem ochrany hlavy při pádu, zároveň však nesmí bránit v rozhledu cyklisty. Měla by být lehká a současně by měla mít silný řemínek, bránící sesmeknutí přilby při pádu.

## 1.1 Konstrukční řešení

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [07] a [08].

Přilby se nejčastěji skládají ze dvou hlavních částí – z pěnové vložky (foam liner), a vnější skořepiny (outer shell).



**Obrázek 1.1** – Hlavní části cyklistické přilby [07]

Pěnovou vložku můžeme považovat za nejdůležitější část přilby, neboť pohlcuje deformační energii. Její vlastnosti tedy ovlivňují, jak kvalitně bude přilba chránit hlavu při nárazu. Povětšinou se pěnové vložky vyrábějí z praktických a designových důvodů v tloušťce 20 mm.

Další již zmíněnou důležitou částí je vnější skořepina. Účelem vnější skořepiny je chránit pěnovou vložku. Měla být dostatečně pevná. Zároveň by nemělo docházet k prasknutí této vrstvy. Tloušťka této části je značně ovlivněna metodou, kterou dochází k prokazování schopnosti cyklistické přilby tlumit náraz. Při testech je simulován dopad helmy na obrubník. Je tedy pochopitelné, že nároky na tloušťku vnější skořepiny jsou zanedbatelné oproti např. pracovním přilbám apod., kde existuje vyšší riziko proniknutí ostrého předmětu helmou.

Neméně důležitým dílem je upevňovací systém, který brání přilbě ve smeknutí z hlavy.



## 1.2 Použitelné materiály

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [07], [09], [10], [11] a [12].

Z velice jednoduché výpočetní úvahy je možno v Ashbyho mapě přibližně získat vhodné materiály pro výrobu tlumicí vložky přilby.

V literatuře [09, str. 153] je uvedeno přetížení, které je již neslučitelné se životem. Jde přibližně o dvě stě padesátý násobek tíhového zrychlení. Ovšem v pojednání o cyklistických helmách [07] nejsou výjimkou ani vyšší hodnoty přetížení, ale přesto jsou tyto hodnoty označovány jako tolerovatelné – hlava je takové deceleraci exponovaná pouze po krátký okamžik (v řádu milisekund). Pro pouhou demonstraci vhodných materiálů bude uvažována hraniční hodnota ze zdroje prvního.

$$a = 250 \cdot g = 250 \cdot 9,81 = 2\,452,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Následně je uvedena přibližná hmotnost hlavy jako 4,6 kilogramů [11].

$$m = 4,6 \text{ kg}$$

Pak dle druhého Newtonova zákona – zákona síly [09, str. 152] platí:

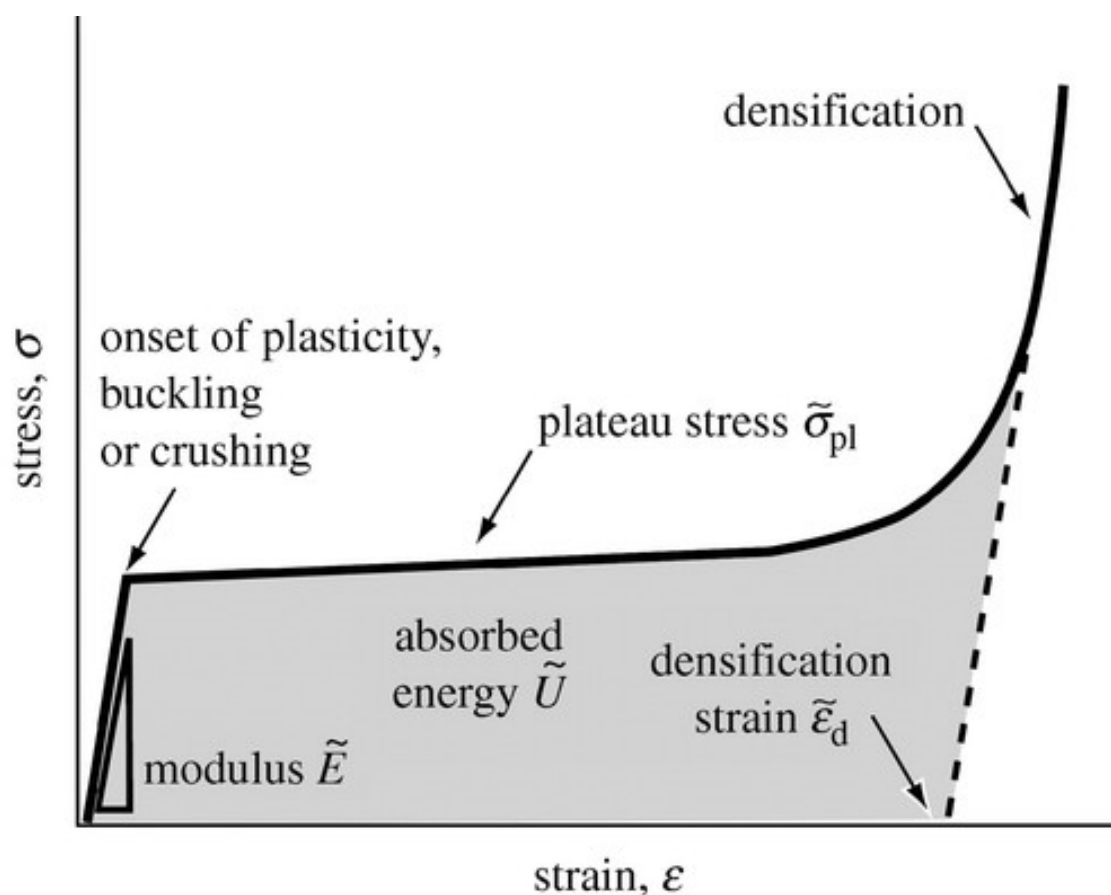
$$F = m \cdot a = 4,6 \cdot 2\,452,5 = 11\,281,5 \text{ N.} \quad (1.1)$$

Dále dle literatury [07] je uvažován průmět hlavy do helmy zhruba jako:

$$S = 10^{-2} \text{ m}^2.$$

A konečně odpovídající tlakové napětí:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{11\,281,5}{10^{-2}} = 1\,128\,150 \text{ Pa} \cong 1,1 \text{ MPa.} \quad (1.2)$$

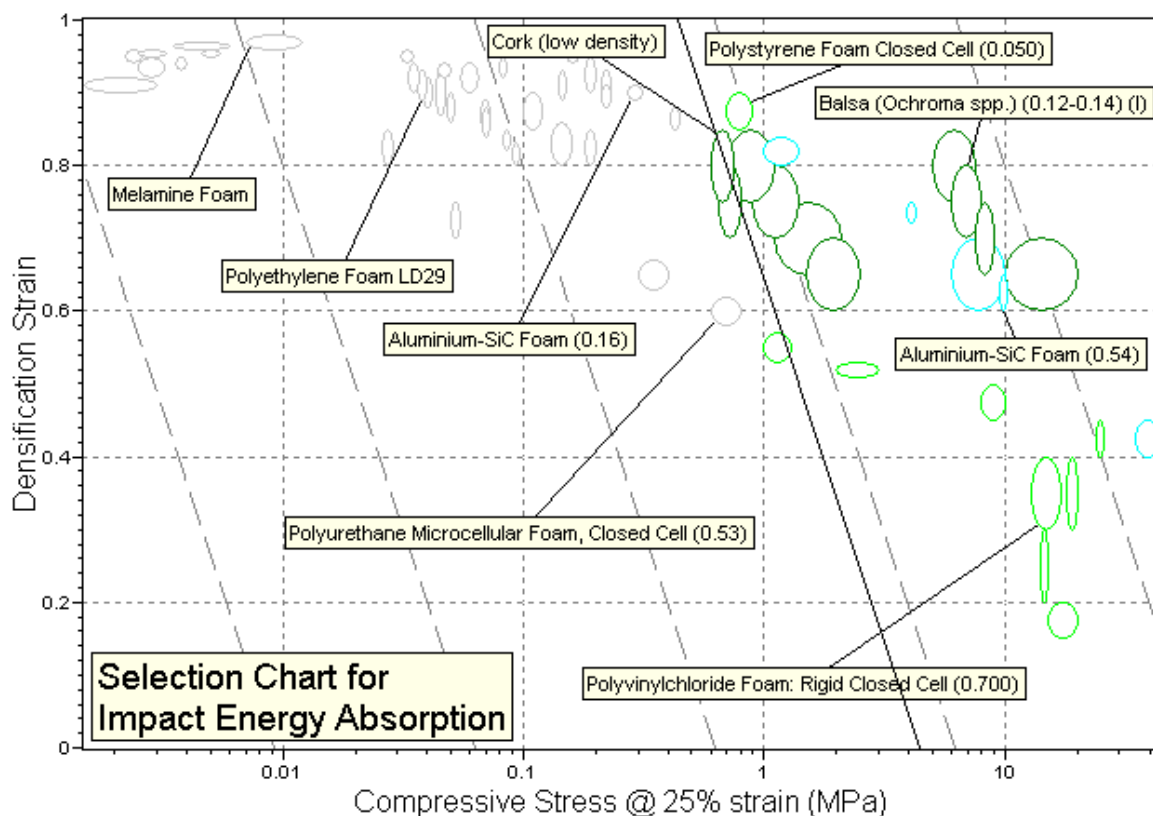


**Obrázek 1.2** – Závislost napětí na poměrném stlačení [10]

Na Obrázku 1.2 můžeme vidět závislost napětí (stress) na přetvoření (strain) pro pěnové materiály. Lineární oblast grafu představuje pružné deformace a je víceméně definovaná přímkou o směrnici  $E$  (Youngův modul). V této oblasti se tedy materiál chová takřka jako lineární pružina.

Při téměř konstantním napětí  $\tilde{\sigma}_{pl}$  (plateau stress) dochází již k plastickým deformacím a současně k největšímu „pohlčení“ deformační energie, tento proces je následně zpomalen zhutňováním polystyrenu (densification), kterému odpovídá poměrné stlačení před začátkem zhutňování materiálu (densification strain –  $\tilde{\epsilon}_d$ ).

Plocha pod křivkou následně představuje absorbovanou deformační energii.



**Obrázek 1.3** – Ashbyho mapa materiálů vhodných k tlumení nárazů [07]

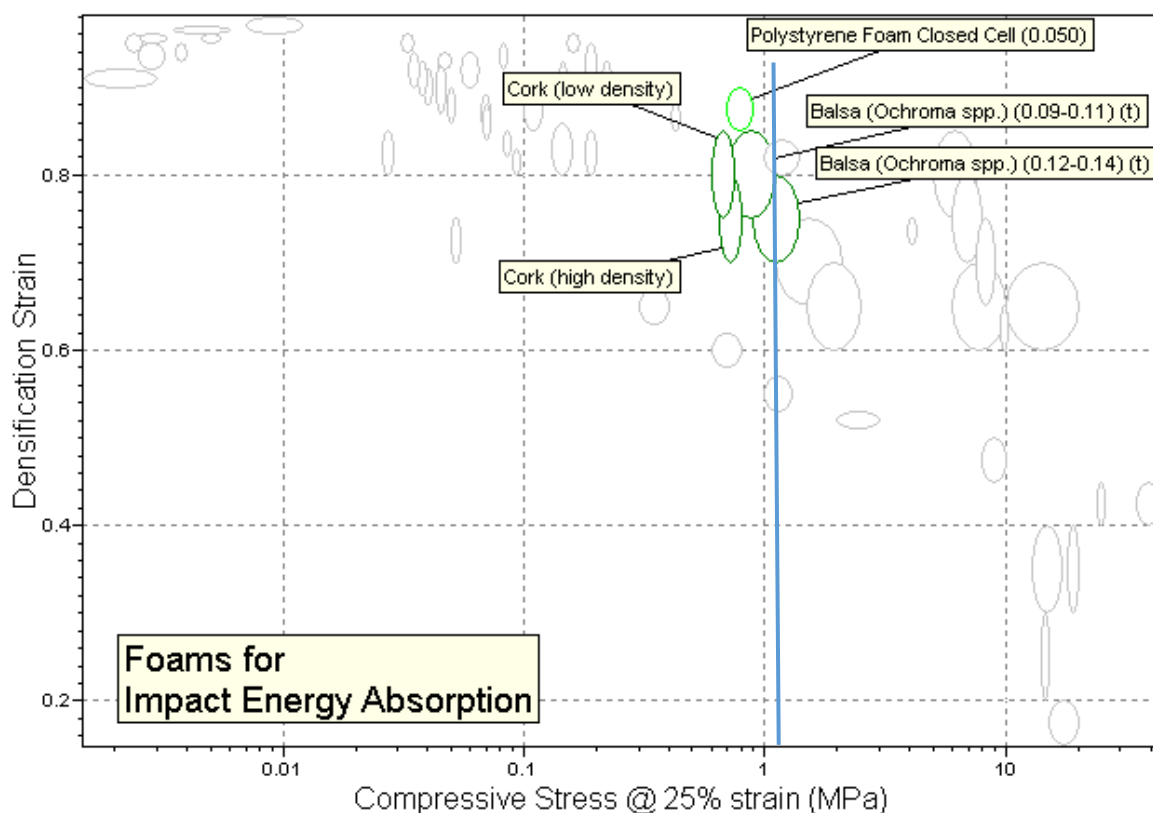
Na Ashbyho mapě můžeme vidět na vodorovné ose tlakové napětí (plateau stress). V literatuře [07] je zmíněno, že nastává přibližně při 25 % poměrného stlačení daného materiálu.

Je požadováno, aby byl materiál schopen pohltit největší deformační energii právě v době, kdy dochází k hraničnímu přetížení hlavy (které se nadále nesmí zvyšovat) vlivem nárazu. Pak tedy z vypočteného tlakového napětí (1.2):

$$\tilde{\sigma}_{pl(0,25)} \cong 1,1 \text{ MPa.}$$

Na svislé ose je vyneseno maximální poměrné stlačení před začátkem zhutňování materiálu (densification strain –  $\tilde{\epsilon}_d$ ). Z obrázku 1.2 je zřejmé, že největší schopnost absorpce deformační energie mají ty materiály, které jsou schopny dosáhnout největšího poměrného stlačení před začátkem zhutňování (densification strain –  $\tilde{\epsilon}_d$ ) při požadovaném napětí, kdy dochází k plastickým deformacím ( $\tilde{\sigma}_{pl}$  – plateau stress).

Pro pěnovou vložku helmy jsou tedy vhodné materiály, které mají nejvyšší schopnost absorpce deformační energie při daném napětí a zároveň mají co nejnížší hustotu, viz vybrané materiály na Obrázku 1.4 v Ashbyho mapě.



**Obrázek 1.4** – Ashbyho mapa materiálů vhodných k výrobě tlumící vložky přileb [07]

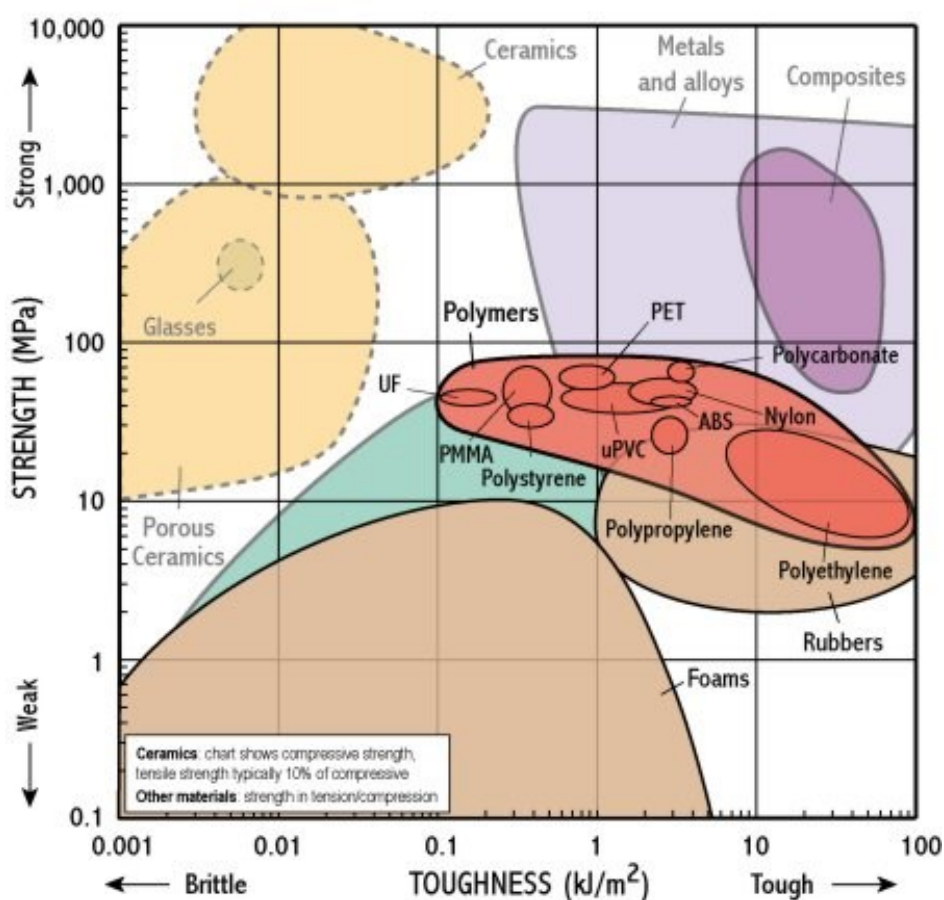
- Polystyrene foam closed cell (0,050) – expandovaný polystyren (EPS) s hustotou  $0,05 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$  což je v jednotkách SI  $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- Balsové dřevo, které je nejlehčím dřevem vůbec a má hustotu v rozmezí  $90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  až  $140 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- Korek s hustotou  $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [12, str. 217].

Je zřejmé, že největší využití při výrobě přileb má právě expandovaný polystyren (EPS). Při malé hustotě má největší schopnost absorbovat deformační energii v rozsahu napětí, které bylo vyvolané maximálně možnou decelerací hlavy při nárazu. Tím je bráněno dalšímu zvyšování přetížení. Samozřejmě to platí do okamžiku, kdy není celá tloušťka materiálu zhutněna. Přesto tloušťka není parametr, kterým by se dala dále významně navyšovat

bezpečnost přilby. Jak již bylo zmíněno, takřka veškeré přilby mají tuto tlumicí část silnou 20 mm a další navyšování nepřichází v úvahu z hlediska designu a dalších praktických důvodů.

Navíc na rozdíl od přírodních materiálů, jako je korek a balza, lze hustotu EPS libovolně měnit množstvím použitých nadouvadel.

V případě vnější skořepiny je situace značně jednodušší. Vnější skořepina by měla být pevná, aby dostatečně chránila vnitřní pěnovou vložku, zároveň by neměla být křehká, aby nedocházelo k jejímu praskání. Taktéž hmotnost by měla být pochopitelně co nejnižší. Zmíněné vlastnosti s různými materiály jsou zobrazeny na následující materiálové mapě.



**Obrázek 1.5** – Materiálová mapa pevnost – houževnatost [08]

Na Obrázku 1.5 můžeme vidět materiálovou mapu, kde svislá osa znázorňuje pevnost a vodorovná houževnatost. Pro výrobu vnějších skořepin se používají materiály pevné, lehké a zároveň houževnaté, jako např. polykarbonát či ABS. Ještě lepší vlastnosti mají různé kompozitní materiály (karbonové).

### 1.3 Technologie zpracování

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [13], [14] a [15].

Podle technologie výroby můžeme cyklistické přilby zjednodušeně dělit na tzv. in-mold a hard-shell.

V případě technologie in-mold je cyklistická přilba vyrobena vstřikováním stlačeného EPS do vnější skořepiny, a to za vysokých tlaků a teplot. Vzniká tak neoddělitelná monolitická konstrukce, která dovoluje použít tenkou a lehkou skořepinu. V současné době se touto technologií vyrábějí kvalitnější cyklistické přilby.

Levnější a méně kvalitnější variantou je technologie hard-shell. Vnější skořepina a pěnová vložka jsou spojeny lepidlem (glue-on), či dokonce pouze lepicí páskou na spodní hraně skořepiny (tape-on). Touto technologií jsou vyráběny hlavně levnější dětské přilby. Nevýhodou je nutnost použití silnější skořepiny, což zvyšuje hmotnost cyklistické přilby.

Velice jednoduše lze identifikovat použitou technologii výroby přilby na následujícím Obrázku 1.6.



**Obrázek 1.6** – Zleva technologie in-mold, hardshell (glue-on) a hardshell (tape-on) [15]

## 2. Normy

V této kapitole bylo čerpáno z literatury [16] a [17].

Přilby pro cyklisty (a pro uživatele skateboardů a kolečkových bruslí) podléhají normě ČSN EN 1078+A1. U této normy je uvedena rešerše z problematiky stanovení schopnosti tlumit náraz, stanovení pevnosti upevňovacího systému a snadnosti jeho uvolnění. Pro provedení patřičných zkoušek je zapotřebí vytvořit makety hlavy, které jsou definované v normě ČSN EN 960.

Při citování např. tabulek hodnot z výše uvedených norem je dbáno na to, aby nedocházelo k porušování zákazu rozmnožování a rozšiřování norem a všech jejich částí dle zákona č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky. V daném zákoně však není definováno, co je míněno částí normy. Proto je citováno jen v takovém rozsahu, aby byl např. zřejmý postup vytvoření geometrie makety přilby dle normy, ale zároveň v této bakalářské práci nejsou uvedeny veškeré hodnoty, které by vedly k vytvoření celé použitelné makety.

### 2.1 ČSN EN 960

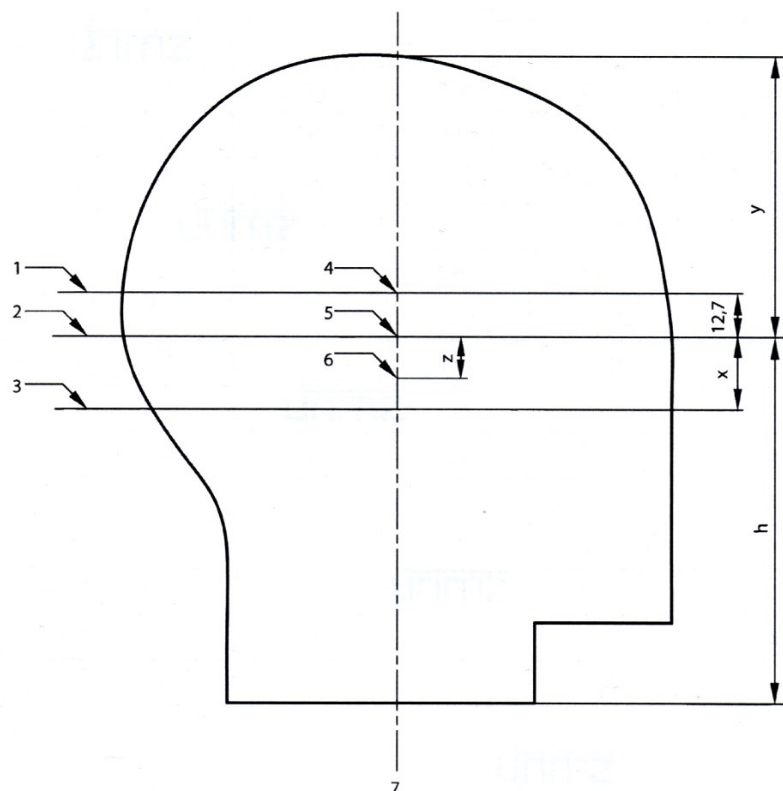
Jedná se o českou verzi evropské normy EN 960:2006, která stanovuje definice, normalizovány jsou materiály maket, jejich všeobecné vlastnosti a označování. Nejobsáhlejší částí normy jsou tabulky s polárními souřadnicemi jednotlivých bodů vnějšího povrchu maket pro každou velikost hlavy od 445 až po 645.

#### TERMÍNY A DEFINICE

- Maketa hlavy – jedná se o trojrozměrnou aproximaci lidské hlavy či její části bez obličejových rysů a ušních boltců. Norma dále definuje tři hlavní tvary:
  - celková maketa hlavy – zahrnuje i část krku,
  - tříčtvrteční maketa hlavy – sahá pod úroveň základní roviny,
  - poloviční maketa hlavy – sahá přibližně na úroveň základní roviny.

- Označení velikosti – v jednotkách mm je dán obvod dané makety hlavy.
- Obvod C – obvod dané makety hlavy v úrovni vztažné roviny.
- Rovina AA' – jedná se o horizontální příčnou rovinu makety hlavy, která je zároveň souběžná se vztažnou rovinou a umístěna je ve vzdálenosti 12,7 mm nad ní. Dle této roviny může být stanovena velikost označení přilby.
- Vztažná rovina – vodorovná rovina, která je umístěna ve vzdálenosti y, měřeno na vertikální středové ose, směrem dolů od středu temene dané makety. Od této roviny jsou dále kótovány polohy všech ostatních vodorovných rovin.
- Vertikální středová osa – jedná se o průsečnici vertikální podélné roviny a vertikální příčné roviny.
- Temeno, vrchol – oblast na svršku povrchu makety přilby, která se nachází kolem průsečíku vertikální středové osy s vnějším povrchem makety přilby.
- Vertikální podélná rovina – rovina souměrnosti makety hlavy, která je zároveň kolmá k základní rovině a nachází se uprostřed mezi levou a pravou stranou makety hlavy.
- Vertikální příčná rovina – vertikální rovina makety hlavy, která je zároveň kolmá k vertikální podélné rovině a také ke vztažné rovině, což také odpovídá koronální rovině lidské hlavy.
- Základní rovina – vodorovná rovina, která je zároveň rovnoběžná se vztažnou rovinou, a od ní je dále vzdálena o rozměr x pod vztažnou rovinou dané makety hlavy.
- Bod A – těžiště tříčtvrteční makety hlavy se nachází na vertikální středové ose a je umístěno ve vzdálenosti 12,7 mm nad vztažnou rovinou dané makety hlavy.
- Bod G – těžiště celkové makety hlavy se nachází na vertikální středové ose a je umístěno ve vzdálenosti zpod vztažnou rovinou dané makety hlavy.
- Bod R – průsečík vertikální středové osy se vztažnou rovinou dané makety hlavy. Z tohoto bodu se pak následně kótují všechny ostatní body na povrchu dané makety helmy.





**Obrázek 2.1** – Řez vertikální podélnou rovinou makety hlavy [16]

Kde je: 1 – rovina AA',  
 2 – vztažná rovina,  
 3 – základní rovina,  
 4 – bod A,  
 5 – bod R,  
 6 – bod G,  
 7 – vertikální středová osa.

**Tabulka 2.1** – Tabulka rozměrů maket hlavy a hmotností [16]

Označení velikosti	h (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Hmotnost (g)
445	108,5	21,0	81,7	9,9	
455	110,6	21,5	83,3	10,1	1 970 ± 75
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
645	150,5	31,0	113,5	41,1	

V Tabulce 2.1 jsou uvedeny první dvě velikosti a následně až poslední, v normě je uvedeno 21 velikostí od 445 do 645, vždy s krokem 10. Údaje se vztahují k obrázku 2.1.

## POLÁRNÍ SOUŘADNICE VNEJŠÍHO POVRCHU MAKETY HLAVY

Vzhledem k dřívějším problémům se stanovením tolerancí jednotlivých rozměrů, jsou v aktuální verzi normy ČSN EN 960 (rok vydání 2007) souřadnice definované pomocí polárního souřadnicového systému. Z bodu „R“, který je dán jako geometrický střed, jsou vynášeny poloměry v jednotlivých úhlech. Těmto rozměrům dále náleží stanovená tolerance.

Způsob, jakým lze z normy aproximovat hlavu dané velikosti, je zřejmější na následujícím příkladu při převzetí částečných hodnot z normy. Jedná se o získání částečného průřezu dané makety hlavy ve vztažné a vertikální podélné rovině pro velikost makety 445.

**Tabulka 2.2** – Polární souřadnice pro celkovou maketu hlavy velikosti 445 [16]

<b>1 - 145</b>		<b>Úhel H</b>				
		<b>0</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>...</b>	<b>180</b>
<b>Úhel V nad</b>	<b>90</b>	80,3	80,3	80,3	...	80,3
	<b>80</b>	79,3	79,1	79,2	...	81,6
	<b>70</b>	78,9	78,8	78,8	...	83,0
	<b>60</b>	79,6	79,6	78,7	...	83,8
	<b>50</b>	80,8	80,7	78,4	...	83,7
	<b>40</b>	81,3	81,1	77,1	...	83,1
	<b>30</b>	80,7	80,5	74,7	...	82,2
	<b>20</b>	79,4	79,0	71,6	...	81,2
	<b>10</b>	78,5	77,5	68,8	...	80,1
<b>Vztažná rovina</b>	<b>0</b>	79,0	77,4	67,6	...	79,0
<b>Úhel V pod</b>	<b>10</b>	80,2	79,3	67,7	...	75,7
	<b>20</b>	84,0	85,1	69,2	...	72,3
	<b>30</b>	91,2	92,5	71,4	...	69,9
	<b>40</b>	103,1	104,5	77,8	...	69,6
	<b>46</b>	113,7	115,2	83,4	...	72,3
	<b>50</b>	110,1	111,2	87,0	...	76,3
	<b>52</b>	107,2	108,3	88,6	...	79,2
	<b>55</b>	103,3	104,3	89,0	...	84,7
	<b>60</b>	97,6	98,4	88,2	...	97,6
	<b>65</b>	101,7	103,5	101,9	...	115,3

Kde je: V – vertikální úhel, který je měřený od vztažné roviny, a to buď nad ní či pod ní,

H – úhel vertikální výseče, který je měřen ve vodorovné rovině od vertikální podélné roviny směrem od čela k týlu.



Norma taktéž uvádí rovnice definující poloměry polárního souřadnicového systému, které mají charakter pouze informativní. Je z nich ovšem patrné, že hodnoty uvedené v Tabulce 2.2 jsou hrubě zaokrouhleny na setiny. To se i následně projevuje při interpolaci, kdy i malá odchylka (násobně menší než povolené tolerance) vytvoří malé „boule“ a „prohlubně“ na liniích, které mají být pravděpodobně rovné. Je tedy zřejmě vhodné tyto úseky aproximovat přímkou.

## MATERIÁLY A VŠEOBECNÉ VLASTNOSTI MAKET

Podpěrné zařízení včetně makety hlavy, nesmí mít rezonanční kmitočet nižší než 2 000 Hz a musí být vyrobeno z kovu, pokud je maketa určena pro pád sestavy makety hlavy/ochranné přilby.

Pro zkoušku, kde je sestava makety hlavy/ochranné přilby pouze upevněna, musí být helma vyrobena z dostatečně pevného materiálu, který neovlivní dané měření, přitom platí výše uvedené hodnoty rezonančního kmitočtu.

Makety určené k pouhému prokazování geometrických rozměrů či pro označení polohy přilby mohou být vyrobeny z libovolného materiálu.

V případě zkoušky, při které padá sestava maketa hlavy/ochranná přilba, platí pro celkové makety hlavy následující vlastnosti:

- v poloměru 10 mm od bodu G musí být umístěno těžiště,
- citlivé osy akcelerometru musí procházet maximálně 10 mm d bodu G a to při libovolném nastavení úhlu makety hlavy,
- maketa hlavy musí mít vhodné závaží.

Dále by mělo být zajištěno, aby celková hmotnost makety hlavy, která je vybavena akcelerometrem včetně systému jeho uchycení, odpovídala normovanému hmotnostnímu rozmezí (viz Tabulka 2.1).

## 2.2 ČSN EN 1078+A1

Česká verze evropské normy ČSN EN 1078+A1 stanovuje požadavky a zkušební metody, kterými jsou testovány přilby pro uživatele jízdních kol, kolečkových bruslí a skateboardů. Požadavky a zkušební metody jsou dány pro:

- konstrukci a zorné pole,
- schopnost pohlcení deformační energie při nárazu,
- vlastnosti upevnění přilby,
- označení a informace od výrobce.

Vzhledem k povaze bakalářské práce je dále uveden rozsáhlejší výtah z kapitoly zabývající se schopností přilby tlumit náraz.

### POUŽITELNÉ MAKETY HLAVY PŘI ZKOUŠKÁCH

Veškeré používané makety hlavy při zkouškách musejí odpovídat normě EN 960:2006, přičemž se pro testy musí používat pouze osm vybraných velikostí maket, jak je uvedeno v Tabulce 2.3. Výjimkou je ovšem zkouška stanovující schopnost přilby tlumit náraz. Pro tuto zkoušku se musí použít výhradně velikosti 495, 535, 575, 605 a 625. Z tohoto důvodu jsou v normě EN 960:2006 uvedeny hmotnosti maket jenom u vybraných velikostí.

Norma ČSN 1078+A1 uvádí i označení, která byla použita v normě EN 960 z roku 1994. V aktuální normě z roku 2006 jsou velikosti maket hlavy označeny jednoduše pouze číslem, které zhruba odpovídá obvodu dané makety ve vztahné rovině v mm.

**Tabulka 2.3 – Velikosti maket hlavy pro zkoušky [17]**

<b>Označení velikosti (obdoba EN 960:1994)</b>	<b>Vnitřní obvod přilby mm</b>
495 (A)	500
515 (C)	520
535 (E)	540
555 (G)	560
575 (J)	570
585 (K)	580
605 (M)	600
625 (O)	620

## POŘADÍ ZKOUŠEK A POČET PŘÍLEB

Pro každou zkoušku jsou zapotřebí čtyři stejné přilby (zkušební vzorky) pro každou velikost makety hlavy, jež leží uvnitř intervalu velikostí daného typu přilby, který poskytuje výrobce.

Pro každou přilbu je pořadí zkoušek uvedeno v Tabulce 2.4.

**Tabulka 2.4** – Pořadí zkoušek a zkoušky na zkušebních vzorcích [17]

Prováděná zkouška	Pořadí zkoušky	Číslo zkušebního vzorku		
Účinnost upevňovacího systému	1.	1	–	–
Schopnost tlumení nárazu	2.	1	2	3
Pevnost upevňovacího systému	3.	–	2	3

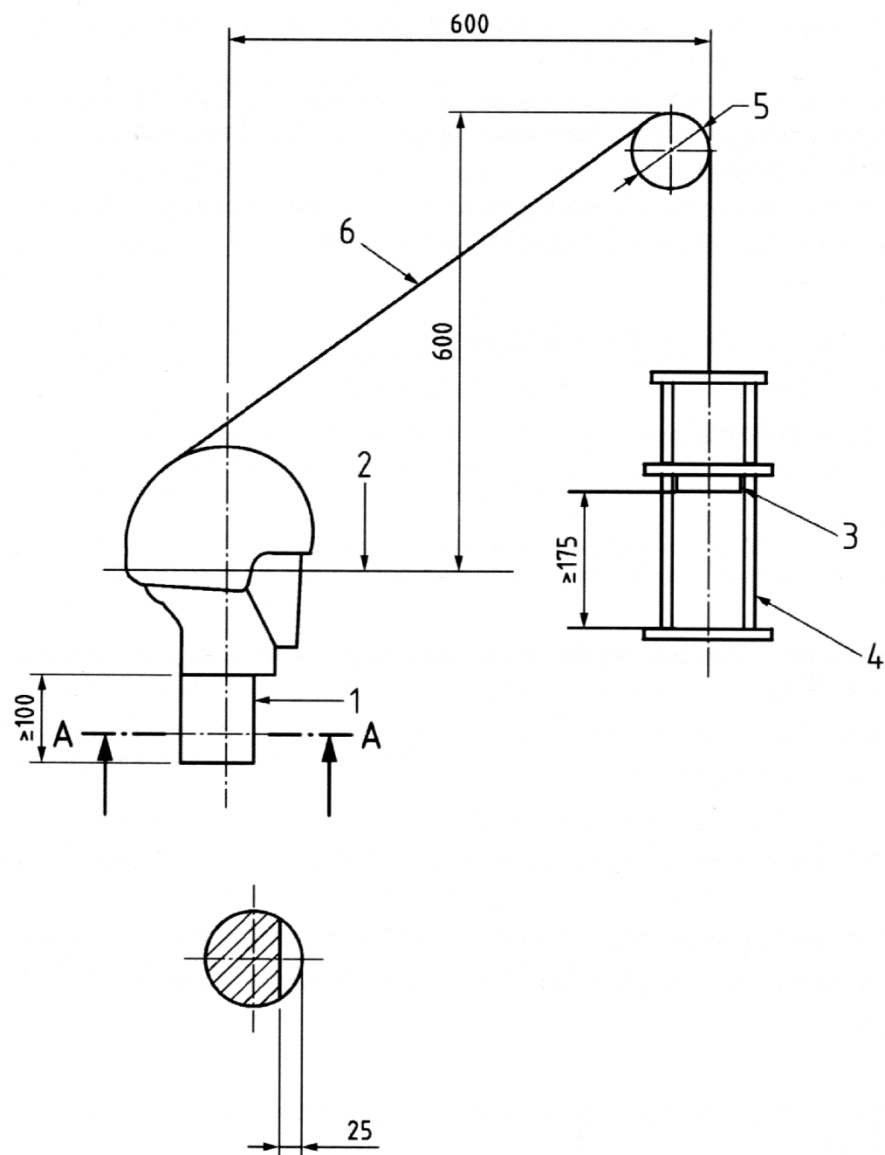
V případě pochybností je čtvrtý zkušební vzorek ponechán jako vzorek srovnávací pro zkušební laboratoře.

## ÚČINNOST UPEVNĚVACÍHO SYSTÉMU

Dle instrukcí výrobce se přilba připevní na maketu hlavy tak pevně, jak jen to je možné. K této zkoušce se použijí tři velikosti maket, a to nejmenší, největší a střední velikost v rozsahu velikostí přilby určeného typu. Následně se za zadní část přilby zahákne hák na řemenu, který je na druhém konci připevněn k padacímu závaží. Po uvolnění padacího závaží z výšky  $(175 \pm 5)$  mm se sleduje, zda se přilba sesmekla.

Dle definice stanovené v normě je upevňovací systém účinný, pokud při této zkoušce nedošlo ke smeknutí přilby z makety hlavy.

Na Obrázku 2.3 je schéma zkušebního zařízení k výše zmíněné zkoušce.



**Obrázek 2.3** – Zkušební zařízení pro zkoušení účinnosti upevňovacího systému [17]

Kde je: 1 – základna,

2 – vztažná rovina,

3 – padací závaží o hmotnosti 10 kg,

4 – vedení padacího závaží, které samotné váží 3 kg,

5 – kladka o průměru 100 mm,

6 – ohebný řemen o minimálním průměru 3 mm.

## ZKOUŠKA PEVNOSTI UPEVNŮVACÍHO SYSTÉMU

Při této zkoušce je hodnoceno dynamické protažení upevňovacího systému, které nesmí být větší než 35 mm. Zbytkové protažení může být maximálně 25 mm, přičemž se započítává i prodloužení vlivem prokluzu upevňovacích součástí.

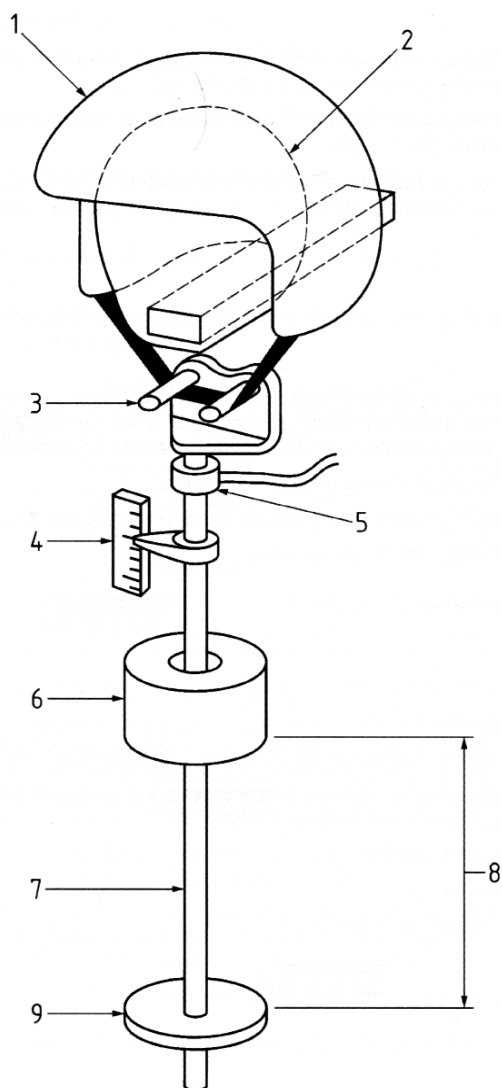
Zkušební zařízení sestává z držáku makety hlavy s přilbou, zatěžovacím zařízením a vhodným zařízením k měření protažení upevňovacího systému.

Zatěžovací zařízení se skládá ze třmenu podbradního pásku a z vedení, které je zakončeno ocelovou nárazkou v podobě nárazové desky. Třmen podbradníku je tvořen ze dvou kovových válečků o průměru  $(12,5 \pm 0,5)$  mm, které jsou od sebe vzájemně vzdáleny o  $(76 \pm 1)$  mm. Vedení musí umožňovat pád závaží z výšky  $(600 \pm 5)$  mm. Hmotnost zatěžovacího zařízení, které neobsahuje padací závaží o hmotnosti  $(4 \pm 0,2)$  kg, musí být  $(5 \pm 0,5)$  kg.

Při zkoušce je helma vystavena působení předběžného zatížení – tíze zatěžovacího zařízení bez závaží. Dále se na nárazovou desku nechá dopadnout padací závaží, přičemž je měřen dynamický posun třmenu podbradního pásku. Po dobu dvou minut je zařízení ponecháno v klidu se spadeným závažím. Po tomto časovém intervalu je měřen zbytkový posun a hodnotí se, zda je možné uvolnit upevňovací systém jednou rukou.

Na Obrázku 2.4 je vyobrazena možná realizace zkušebního zařízení pro zkoušení pevnosti upevňovacího systému.





**Obrázek 2.4** – Zkušební zařízení pro zkoušení pevnosti upevňovacího systému [17]

- Kde je:
- 1 – přilba,
  - 2 – maketa hlavy,
  - 3 – třmen podbradního pásku,
  - 4 – měřič protažení,
  - 5 – siloměr, který je volitelný,
  - 6 – padací závaží,
  - 7 – vedení,
  - 8 – pádová výška,
  - 9 – nárazová deska.

## STANOVENÍ SCHOPNOSTI PŘILBY TLUMIT NÁRAZ

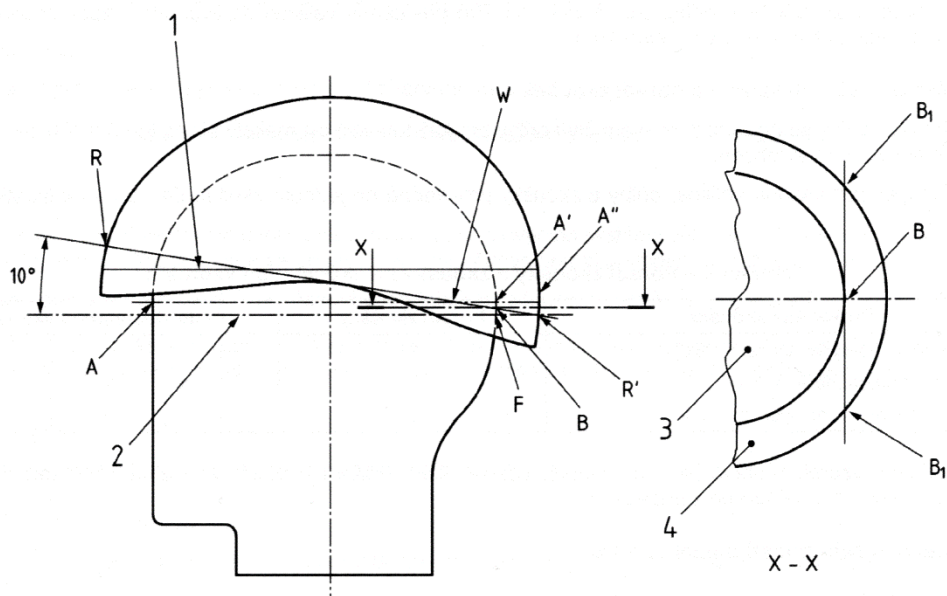
Pro stanovení schopnosti tlumení nárazu je zapotřebí vyznačit patričné body na maketě hlavy a přilbě.

Bod B náleží maketě hlavy a leží uprostřed mezi bodem A' a bodem F. Bod A' leží v rovině AA' a zároveň v nejzadnější části makety hlavy. Pro bod F platí to samé, co pro bod A', ale s tím rozdílem, že leží v rovině vztažné.

Následně je přilba nasazena na maketu hlavy a je vystavena zatížení svislou silou 50 N. Pokračuje se ve vynášení bodů B1 a B2, tentokrát již na povrch přilby. Tyto body jsou vodorovným průmětem bodu B na oba vnější boky přilby.

Na přilbě se vyznačí linie AA'', která leží v rovině AA'. Zhruba 20 mm nad linii AA'' se vyznačí rovnoběžná linie s rovinou AA', která slouží jako nulová linie pro měření úhlu. Poslední zakreslenou čarou je linie RR', která prochází body B1 a B2, přičemž tato linie je natočena o 10 ° nahoru od nulové linie.

Veškeré oblasti přilby ležící nad linií RR' jsou určeny pro testování nárazu na plochou podložku. Části přilby ležící nad linií RWA'' jsou oblastí pro zkoušení nárazu na obrubníkovou podložku. Bod W je definován jako průsečík linie AA'' a RR'. Zmíněné body a linie jsou přehledněji vyobrazeny na Obrázku 2.5.



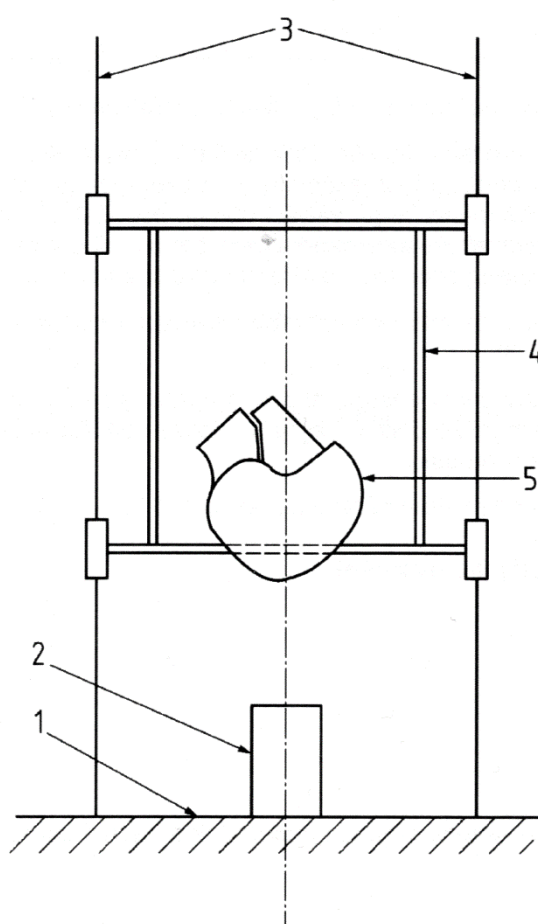
**Obrázek 2.5** – Definování zkušebních oblastí [17]

Kde je:     1 – nulová rovina pro měření úhlu,  
              2 – vztažná rovina,  
              3 – maketa hlavy,  
              4 – přilba.

Zkušební zařízení pro stanovení schopnosti přilby tlumit náraz zahrnuje následující části:

- nárazovou podložku, která je pevně připojená k základně,
- zařízení realizující vedení během volného pádu,
- pohyblivý nosič, který drží přilbu a kovovou maketu,
- kovovou maketu hlavy obsahující tříosý akcelerometr,
- zařízení, které zaznamenává a zpracovává výstupní data z akcelerometru,
- zařízení k seřízení bodu nárazu doprostřed nárazové podložky.

Schéma zkušebního zařízení je znázorněno na Obrázku 2.6.



**Obrázek 2.6** – Zkušební zařízení pro stanovení schopnosti přilby tlumit náraz [17]

Kde je:

- 1 – základna,
- 2 – nárazová podložka,
- 3 – vedení,
- 4 – pohyblivý nosič,
- 5 – přilba s maketou hlavy.

Základna je vytvořena z celistvého betonového či ocelového bloku nebo z kombinace obou materiálů. Hmotnost tohoto základu musí být minimálně 500 kg. Žádná část základny nebo nárazové podložky nesmí vykazovat rezonanční kmitočet, který by mohl ovlivnit výsledek měření.

Norma definuje dva typy nárazových podložek. Dopad na rovinnou plochu je realizován v podobě ploché kruhové nárazové podložky o průměru  $(130 \pm 3)$  mm. Další nárazová podložka napodobující dopad na obrubníkový kámen je vyrobena z oceli s následujícím profilem:

- obě strany nárazové podložky jsou skloněny o  $(52,5 \pm 2,5)^\circ$  od svislice,
- tyto boční plochy se stýkají na nárazové hraně, která má poloměr zaoblení  $(15 \pm 0,5)$  mm,
- výška ocelové podložky musí být minimálně 50 mm a délka minimálně 125 mm.

Chronologie zkušebního postupu a parametry jednotlivých zkoušek jsou znázorněny v Tabulce 2.5.

**Tabulka 2.5 – Parametry zkoušek [17]**

<b>Číslo zkušebního vzorku</b>	<b>Klimatizování</b>	<b>Nárazová podložka</b>
1	vysoká teplota	obrubníková
	bez opětovného klimatizování	plochá
2	nízká teplota	plochá
	bez opětovného klimatizování	obrubníková
3	umělé stárnutí	obrubníková
	bez opětovného klimatizování	plochá

Nárazy se provádějí na předem vybraná oslabená místa, jako jsou např. větrací otvory, přičemž tato nárazová místa musejí být vystředěna do středu nárazové podložky. Jednotlivá místa nárazu na každém vzorku musejí být od sebe vzdálena minimálně 150 mm (délka tětiny). První náraz je proveden do 1 min od vytažení přilby z klimatické komory následující nárazy do 3 min.

Vysoké teploty přilby je docíleno vystavením přilby teplotě  $(+50 \pm 2)^\circ\text{C}$  po dobu 4 až 6 h. Při nízké teplotě je přilba vystavena prostředí o teplotě  $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$  po stejnou dobu jako při teplotě vysoké.

Stárnutí je experimentálně simulováno UV zářením xenonové výbojky, která je v baňce z křemenného skla, o jmenovitém výkonu 125 W po dobu 48 h. Při tomto experimentu je přilba umístěna ve vzdálenosti 250 mm od dané výbojky. Následně je vystavena proudu vody o průtoku  $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , a to po dobu 4 až 6 h při pokojové teplotě.

Dle normy ČSN EN 1078+A1 je přilba schopna tlumit náraz, pokud dostatečně chrání čelo, týl, boční strany hlavy, spánky a temeno hlavy. Zároveň při zkoušce ke stanovení schopnosti přilby tlumit náraz nedojde k překročení největšího zrychlení 250 g u každého nárazu při:

- rychlosti  $5,42^{+0,1}_0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  u ploché nárazové podložky,
- rychlosti  $4,57^{+0,1}_0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  u obručkové nárazové podložky.

Tyto rychlosti jsou měřeny maximálně 60 mm před místem nárazu, a to s přesností 1 %.

Pro případnou konstrukci zařízení dle Obrázku 2.6 můžeme uvažovat teoretickou minimální potřebnou pádovou výšku, kterou umožní vedení a pohyblivý nosič, jednoduše ze vtažů pro rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb s nulovou počáteční rychlostí a dráhou.

$$v = g \cdot t \Rightarrow t = \frac{v}{g} \quad (2.1)$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \Rightarrow s = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{g} \quad (2.2)$$

Pro rychlost  $5,42^{+0,1}_0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  u ploché nárazové podložky je teoreticky minimální potřebná pádová výška:

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{g} = \frac{1}{2} \cdot \frac{5,42^2}{9,81} = 1,497 \text{ m} = 1\,497 \text{ mm}. \quad (2.3)$$

A nakonec pro rychlost  $4,57^{+0,1}_0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  u obručkové nárazové podložky:

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{g} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4,57^2}{9,81} = 1,064 \text{ m} = 1\,064 \text{ mm}. \quad (2.4)$$

Kde je:  $v$  – rychlost dopadu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $g$  – přibližné tíhové zrychlení na Zemi [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  
 $t$  – čas [s],  
 $s$  – teoretická minimální pádová výška [m].

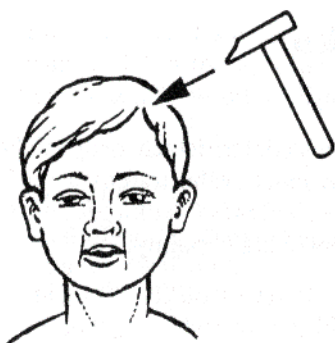
### 3. Biomechanika kraniocerebrálního poranění

V této kapitole bylo čerpáno z literatury [02] a [03].

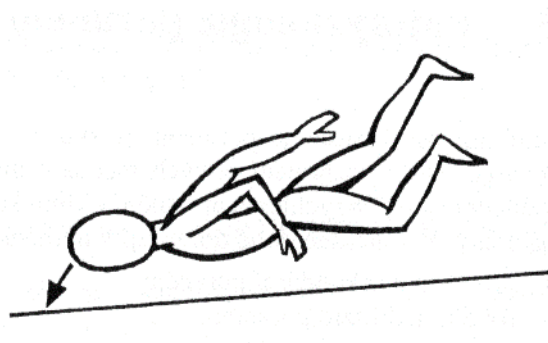
Kraniocerebrální poranění (dále jen KCP) je povětšinou způsobeno dynamickou silou, která působí v krátkém čase. Rozlišujeme dva hlavní mechanismy poranění, a to kontaktní a inerciální.

Kontaktním mechanismem dochází ke vzniku KCP nárazem hlavy na relativně stacionární povrch anebo nárazem pohybujícího se objektu do hlavy. Vzácně také dochází ke KCP v důsledku pomalých statických sil, při kterých je hlava drcena, což zpravidla způsobí vážné fraktury.

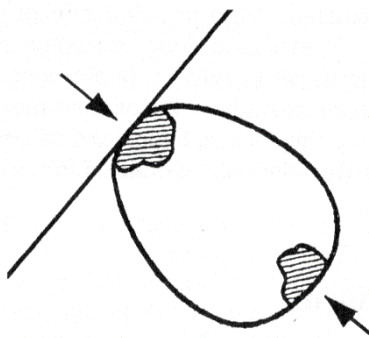
O povaze poranění při kontaktním mechanismu také rozhoduje velikost konstantní plochy. Malé ostré předměty způsobují zpravidla otevřená poranění (Obrázek 3.1) a větší kontaktní plochy lineární fraktury (Obrázek 3.2). Při kontaktním mechanismu dochází zpravidla také ke vzniku kontuzí, a to i na opačné straně nárazu – tento mechanismus se nazývá par contre-coup (Obrázek 3.3).



**Obrázek 3.3** – Otevřené poranění v důsledku poranění malým ostrým předmětem [02]

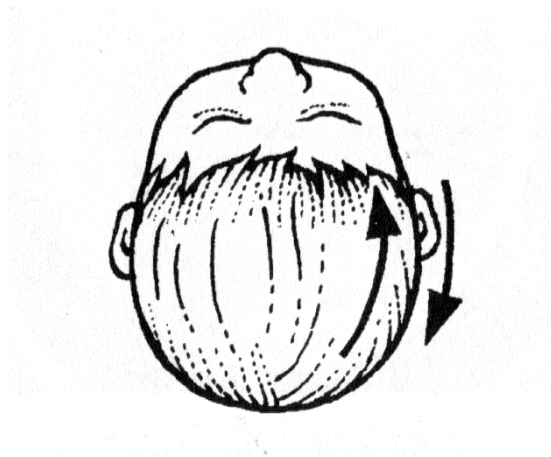


**Obrázek 3.2** – Vznik lineárních fraktur vlivem nárazu na velkou kontaktní plochu [02]

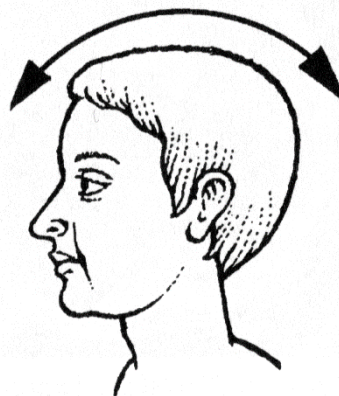


**Obrázek 3.1** – Mechanismus par contre-coup [02]

Inerciálním mechanismem dochází k poranění mozku vlivem náhlého zrychlení a zpomalení, např. při prudkém pohybu v krční páteři (Obrázek 3.4 a 3.5). Zpomalení či zrychlení způsobuje tenzní a kompresní síly, které napínají a stlačují nervovou tkáň mozku a způsobují tak různé typy difuzního axonálního poranění.



**Obrázek 3.5** – Rotační akcelerace způsobující protichůdný pohyb mozku a kalvy [02]



**Obrázek 3.4** – Translační akcelerace způsobující pohyb hlavy zepředu dozadu [02]

### 3.1 Difuzní axonální poranění

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [18] a [19].

Jedná se o samostatný druh traumatického poškození mozku, který byl objasněn teprve před dvaceti lety. Dřívější zobrazovací metody nebyly natolik podrobné, aby DAP mohlo být prokázáno a pochopeno. Veškeré projevy DAP byly tedy připisovány kontuzím s edémem mozku, které většinou DAP doprovázejí.

DAP je přítomno takřka u poloviny pacientů s těžkým poraněním hlavy a je příčinou úmrtí více než jedné třetiny pacientů s kranio cerebrálním poraněním. O závažnosti tohoto poranění také svědčí velice obtížná rekonvalescence. DAP je také hlavní příčinou vegetativního stavu pacientů po úrazech hlavy.

Zjednodušeně se v případě DAP jedná o traumatické, mikroskopické poškození axonů, které je široce rozšířeno v bílé hmotě mozku.

A. Holbourn ve své práci *Mechanics of head injuries* přispěl k přijetí teorie, že rotační složka pohybu je hlavním důvodem poškození mozku. Považoval mozek za prakticky nestlačitelný, a proto jej za tohoto předpokladu přímočaré zrychlení nemůže deformovat a následně poškodit. Úhlové zrychlení ovšem vyvolává střížné síly, které vyvolávají DAP.

#### SOUČASNÉ CYKLISTICKÉ PŘÍLBY A DAP

Při hledání nejbezpečnějších přileb na trhu je možno si povšimnout, že existuje malý počet výrobců, kteří jsou si vědomi nebezpečnosti DAP. U dražších cyklistických přileb je tak možné nalézt technologii MIPS (multi-directional impact protection System), která umožňuje relativní kluzný pohyb mezi vnější a vnitřní skořepinou.



Obrázek 3.6 – technologie MIPS [19]



## 4. Designový návrh nové cyklistické přilby

Tento design vznikl v rámci bakalářské práce studenta Průmyslového designu Bc. Matěje Martínka, který mi zároveň tuto práci ochotně poskytl včetně 3D modelů cyklistické přilby.



**Obrázek 4.1** – Konečný design cyklistické přilby navržené Bc. Matějem Martínkem [20]

Byla také navržena složitá vnitřní struktura s délkou hrany čtyřstěnné buňky 8 mm a tloušťkou vlákna 1,5 mm.



**Obrázek 4.2** – Vnitřní struktura navržená Bc. Matějem Martínkem [20]

Před získáním modelů cyklistické přilby a vnitřní struktury byla bakalářská práce Bc. Matěje Martínka mým jediným podkladem k uvažování o následujícím postupu při tvorbě výpočtového modelu ze zmíněného designu.

Z bakalářské práce Bc. Matěje Martínka mi byla známa hmotnost vnější skořepiny a vnitřní struktury. Vnější skořepina vyrobená z polyamidu PA 11 od firmy HP by vážila zhruba 0,5 kg. Vzhledem k tomu, že již pouhá svrchní část převyšovala hmotnosti běžných cyklistických přileb, považoval jsem snížení této hmotnosti za primární cíl ještě před započítáním výpočetních analýz. Následně jsem uvažoval, zda by bylo pro výpočet možno nahradit vnitřní strukturu nosníkovými prvky.

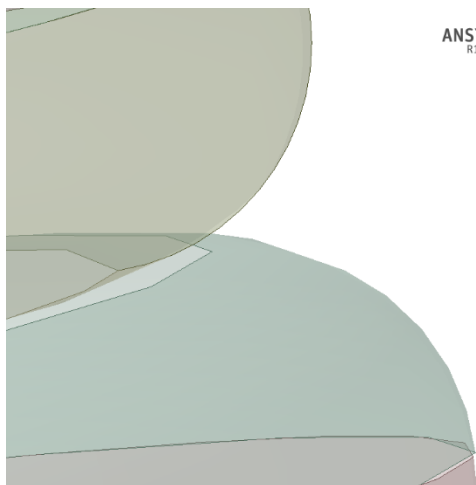
## 4.1 Oprava původní vnější skořepiny

Vnější skořepina obsahovala velké množství komplikovaných prvků, jako jsou šestiúhelníkové větrací otvory a nepravidelné přechody mezi jednotlivými plochami. Pomocí nástrojů v programu SpaceClaim byly vyhledány problémové oblasti, které bránily ve vytvoření objemového prvku z ploch.

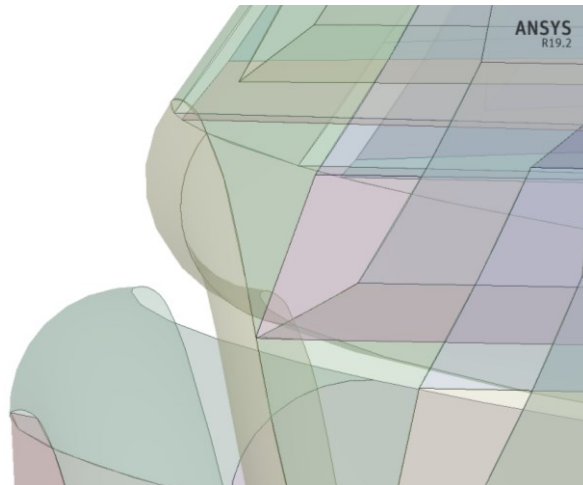


**Obrázek 4.3** – Problémové „nesešité“ oblasti modelu

Původní model také obsahoval opravdu mnoho „nesešitých ploch“. Byl zde použit i naprosto odlišný koncept 3D modelování. Bylo zřejmé, že v programu Rhinoceros 3D byly vytvořeny designérem jednotlivé prvky z ploch, které k sobě byly následně pouze přisunuty a již nespojeny. Přesto jsem i nadále pokračoval s opravou modelu s co nejmenším zásahem do designu. Chybějící přechodové plochy byly vytvořeny pomocí příkazu „Přechod“.

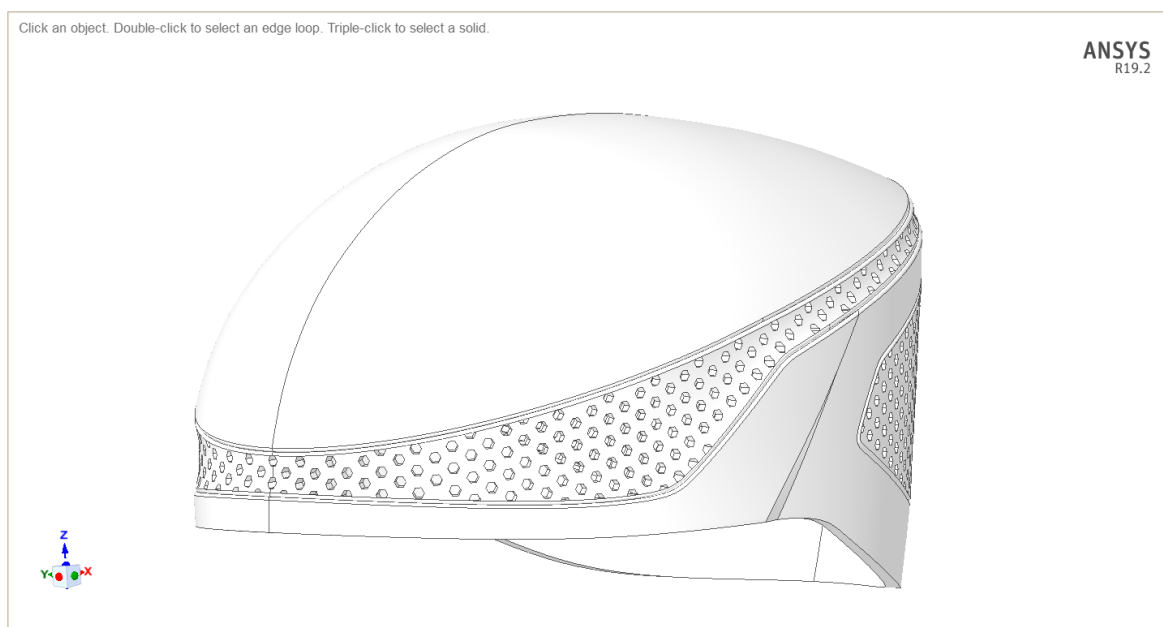


**Obrázek 4.5** – Neřešený přechod mezi zaoblením prostřední a spodní částí přilby



**Obrázek 4.4** – Neřešený přechod mezi zaoblením horní a prostřední částí přilby

Po opravení všech problémových oblastí vznikl z ploch objemový prvek.



**Obrázek 4.6** – Opravená původní vnější skořepina

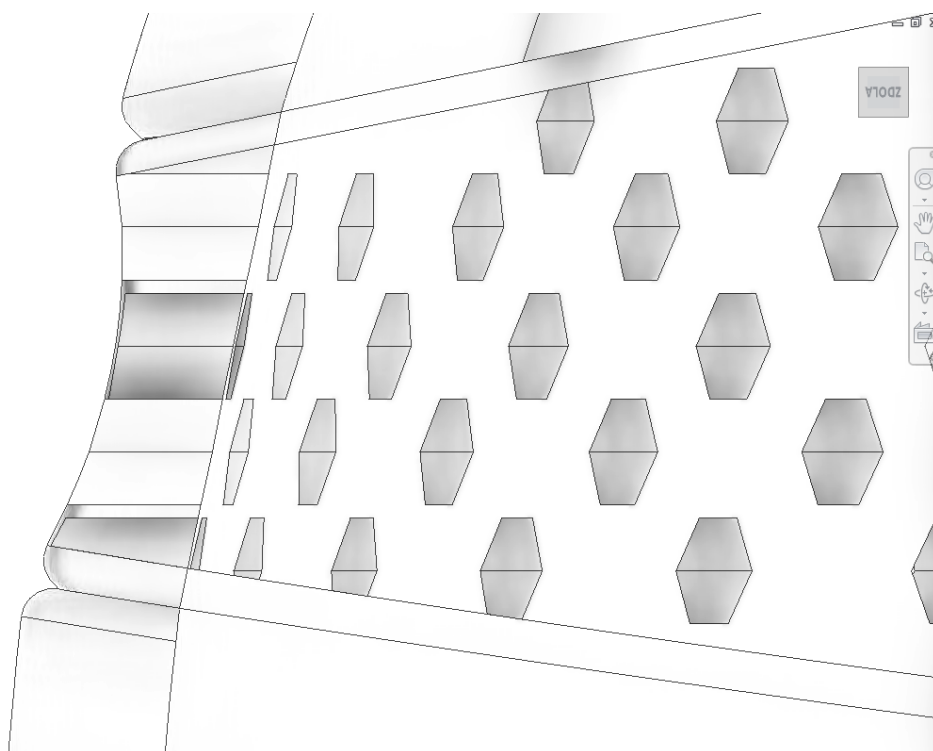
V případě, že by byla navržená tloušťka původní skořepiny vhodná, bylo by možné pokračovat ve zjednodušování a úpravě tohoto modelu. Vzhledem k tomu, že by tato skořepina vážila takřka 0,5 kg, nepřicházelo ponechání původní tloušťky v úvahu.

U běžných přileb, které jsou vyrobeny klasickou metodou in-mold bývá tloušťka vnější skořepiny přibližně 0,2 mm. Nejsem obeznámen s jediným racionálním důvodem, proč by měla mít skořepina v případě 3D tisku tloušťku až 5 mm, jak bylo v původním návrhu.

Jediným problémem by mohla být technologie 3D tisku na nejstarších 3D tiskárnách. Vzhledem k tomu, že nový design přilby byl navržen pro firmu Invent Medical Group, s. r. o., která disponuje nejmodernější 3D tiskárnou, nelze ani tento důvod brát v úvahu.

V případě tisku na moderních 3D tiskárnách se právě nabízí koncept co nejcelistvější přilby, kdy vnější skořepina slouží pouze ke krytí vnitřní struktury.

Pokud by ovšem i tak byla např. tloušťka skořepiny 0,2 mm problematická pro tisk i na modernější 3D tiskárně, měla by být tloušťka ponechána jako volitelný parametr. To ovšem není možné, neboť vnitřní a vnější povrch skořepiny není tvarově totožný (Obrázek 4.7), a proto nelze automaticky vytvořit střední plochu, které by se pouze přiřadila tloušťka.



**Obrázek 4.7** – Řez v rovině symetrie původní přilby, přední část

Dalším viditelným problémem byly i ostré přechody mezi zaobleními. Designově model působí pěkně, tento přechod by ovšem dozajista způsoboval zbytečnou koncentraci napětí a v případě výpočtového modelu taktéž singularitu. To samé lze říci i o všech šestihranných dírách, které slouží k větrání.

Z toho důvodu jsem přistoupil k možnosti vytvoření plochy z vnějšího povrchu, které může být pohodlně přiřazena takřka libovolná tloušťka.

## 4.2 Vytvoření nové vnější skořepiny

Z modelu původní vnější skořepiny jsem použil pouze vnější povrch, který jsem dále upravoval. Ve snaze o co nejmenší změnu designu jsem z ostrých přechodů vytvořil zaoblení. Tento zaoblený přechod je proměnný, neboť vzdálenost mezi jednotlivými plochami nebyla konstantní. Této ploše následně lze pohodlně přiřadit téměř libovolnou tloušťku ve většině 3D modelářích. Na níže uvedených obrázcích (Obrázek 4.8 a 4.9) je vytvořená nová vnější skořepina s tloušťkou 0,2 mm, která je běžná u většiny cyklistických přileb.



**Obrázek 4.9** – Řez zadní částí upravené skořepiny



**Obrázek 4.8** – Řez přední částí upravené skořepiny

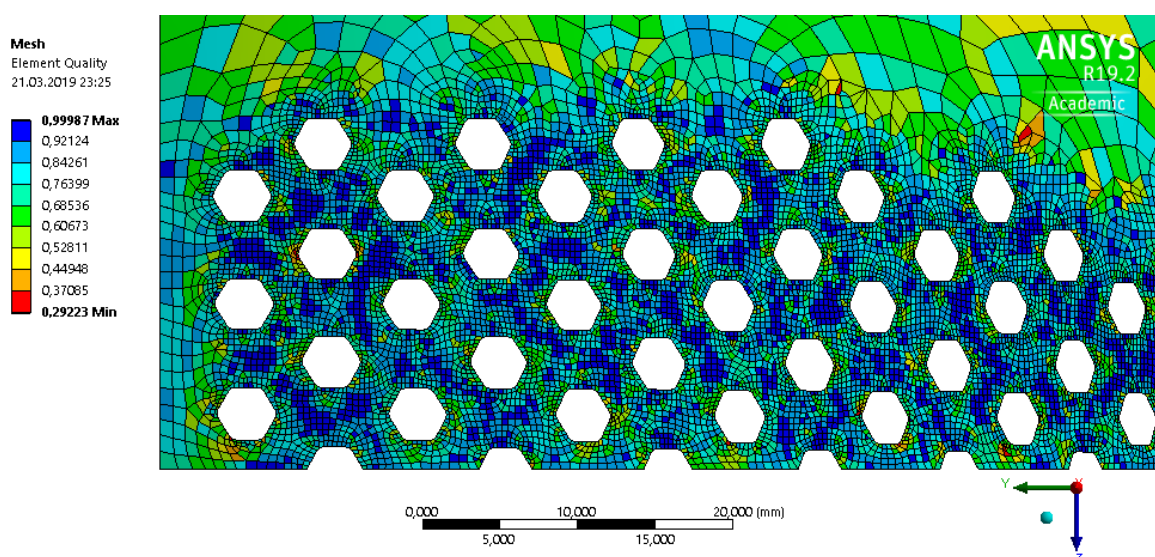
Po zaoblení přechodů mezi jednotlivými plochami a také po vytvoření minimálního zaoblení s poloměrem 0,2 mm v rozích větracích otvorů považuji takto upravenou skořepinu za použitelnou pro cyklistickou přilbu.

## 5. Výpočtový model nové cyklistické přilby

### 5.1 Zjednodušený výpočtový model skořepiny

Je třeba brát v úvahu, že účel vnější skořepiny slouží pouze k ochraně vnitřní struktury, na množství pohlcené energie má zanedbatelný vliv. Pro prvotní výpočtový model by ponechání designových prvků znamenalo zbytečné množství elementů, a to i při ponechání hrubé sítě (Obrázek 5.1).

Po doplnění vnitřní struktury by pravděpodobně nebylo možné provést výpočet tohoto modelu se studentskou licencí programu ANSYS Workbench.



**Obrázek 5.1** – Vliv větracích otvorů na tvorbu sítě

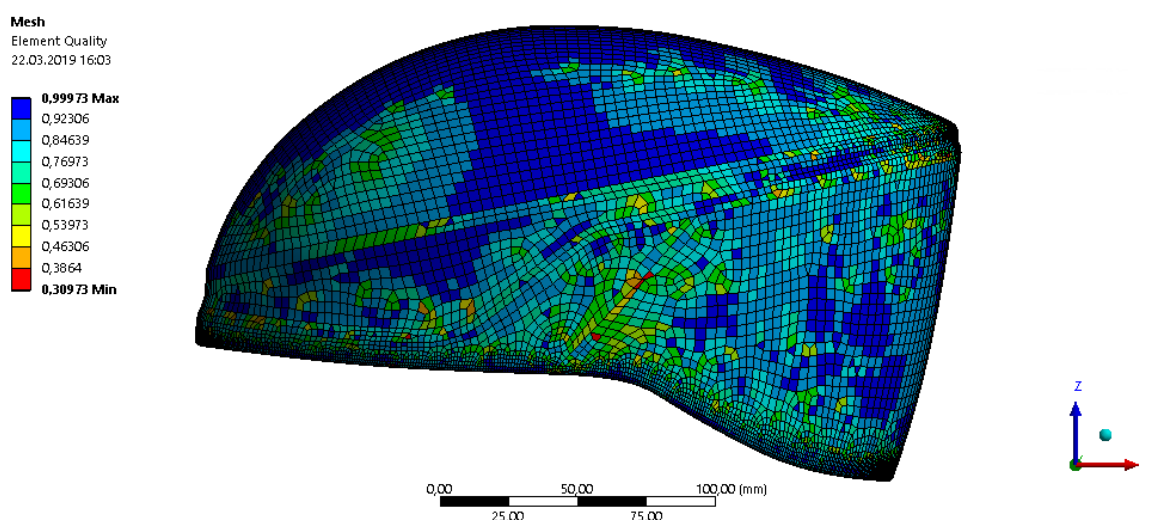
Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro výpočtový model odstranit větrací otvory. Na obrázku 5.1 je vidět, že při jemnější diskretizaci větracích otvorů užívaný software překračuje povolený limit počtu konečných prvků. Z výše uvedeného důvodu se zjednodušení modelu vypuštěním otvorů jeví jako jediná možnost.

Jsem si také vědom, že tímto krokem se částečně změní tuhost výpočtového modelu od upraveného designového. Přesto nepovažuji tento postup za chybný. Skořepina má zanedbatelnou tloušťku oproti vnitřní struktuře a jejím účelem je právě pouze ochrana této struktury.

Z výše uvedených důvodů jsem vytvořil výpočtový model bez děr a také jsem zjednodušil zaoblené přechody.



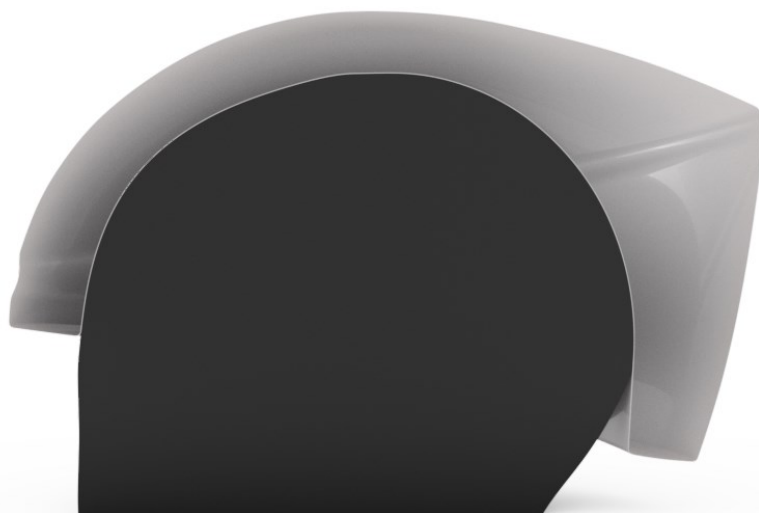
**Obrázek 5.2** – Render výpočtového modelu vnější skořepiny



**Obrázek 5.3** – Vysíťovaný výpočtový model vnější skořepiny

Po zjednodušení vnější skořepiny jsem pokračoval vytvořením vnitřní části. Využil jsem znalosti získané při tvorbě rešerší norem ČSN EN 960 a ČSN EN 1078+A1. Vymodeloval jsem částečnou maketu hlavy velikosti 575, která se používá při pádových zkouškách. Na maketu jsem dále umístil přilbu tak, aby neomezovala zorné pole dle normy ČSN EN 1078+A1 a následně jsem podle této makety vytvořil vnitřní skořepinu.





**Obrázek 5.4** – Výpočtový model skořepiny s částečnou maketou hlavy

## 5.2 Výpočtový model vnitřní struktury

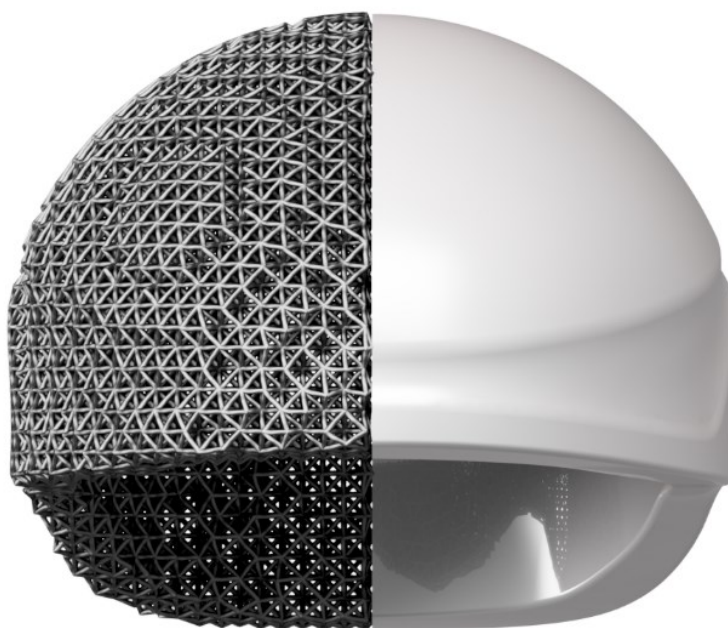
V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [20], [21] a [22].

Původní vnitřní struktura byla navržena s délkou hrany čtyřstěnné buňky 8 mm a tloušťkou vlákna 1,5 mm.

V programu Element firmy nTopology jsem vytvořil mřížku se stejnými parametry. Následně již bylo možné exportovat vytvořenou mřížku ve formátu STEP. V prostředí SpaceClaim pak bylo možné pohodlně převést hrany buněk na jednotlivé nosníkové prvky s přiřazeným parametrem průřezu.

Z důvodu zjednodušení byl pak vytvořen výpočtový model vnitřku přilby z plného materiálu, kterému byla přiřazena stejná tuhost, jakou má komplikovaná mřížková vnitřní struktura.

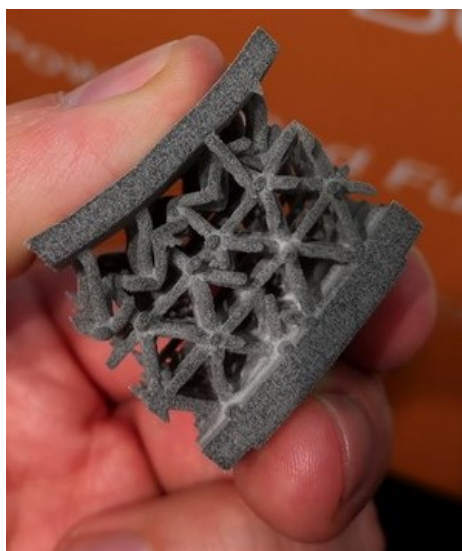




**Obrázek 5.5** – Výpočtový model skořepiny s vnitřní strukturou

#### MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI VNITŘNÍ STRUKTURY

V bakalářské práci Bc. Matěje Martínka byl navržen materiál TPU. Bohužel tento materiál bude oficiálně dostupný k tisku na 3D tiskárnách HP až v polovině roku 2019, a proto nejsou dosud známy jeho vlastnosti.



**Obrázek 5.6** – Mřížková struktura vytištěná z TPU

Z tohoto důvodu je prozatím uvažován stejný materiál jako u vnější struktury, tedy PA 11. Jedná se o vhodný materiál k tisku protéz, pružných pantů apod.

Dle dostupných informací jsou mechanické vlastnosti materiálu PA 11 následující:

$$E = 1\,800 \text{ MPa},$$
$$\mu = 0,3 \div 0,4 \text{ (volím střední hodnotu)}.$$

Kde je:  $E$  – Youngův modul [MPa],

$\mu$  – Poissonovo číslo [–].

Výše zmíněné mechanické vlastnosti PA 11 byly přiřazeny modelu složité tetraedrické mřížky ve tvaru krychle pro zjištění Youngova modulu a Poissonova čísla takto vymodelované monolitické struktury.

#### PŘÍPRAVA VÝPOČTOVÉHO MODELU VNITŘNÍ STRUKUTRY

Vytvořil jsem krychli o hraně  $a = 90,510 \text{ mm}$ , z tetraedrické mřížky s délkou hrany buňky  $8 \text{ mm}$ . Tato krychle obsahuje 11 424 nosníků.

##### C: Static Structural

Static Structural

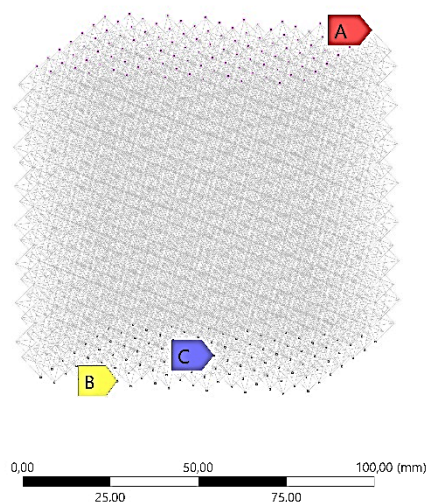
Time: 1, s

30.03.2019 23:18

**A** Nodal Force: 1000, N

**B** Displacement

**C** Fixed Support



**Obrázek 5.7** – Aplikace okrajových podmínek na kvádr z tetraedrické mřížky

Na krychli jsem aplikoval následující okrajové podmínky:

- síla o velikosti 1 000 N je rozložena mezi veškeré horní uzly a její směr je rovnoběžný s osou y,
- uzly, které se nacházejí uprostřed spodní strany krychle mají 0 stupňů volnosti, okolní se mohou pohybovat ve směru osy x a z.

Prodloužení ve směru namáhání při zmíněných okrajových podmínkách je:

$$\Delta a_y = 0,24255 \text{ mm},$$

a ve směru kolmém na namáhání:

$$\Delta a_x = \Delta a_z = -2 \cdot 0,04362 = 0,08724 \text{ mm},$$

při hraně délky:

$$a = 90,510 \text{ mm}.$$

Následně lze vypočíst Youngův modul z Hookova zákona:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (5.1)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta a_y}{a}} = \frac{F \cdot a}{a^2 \cdot \Delta a_y}, \quad (5.2)$$

$$E = \frac{F}{a \cdot \Delta a_y} = \frac{1\,000}{90,510 \cdot 0,24255} \cong 45,551 \text{ MPa}. \quad (5.3)$$

A konečně Poissonovo číslo:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{\frac{\Delta a_x}{a}}{\frac{\Delta a_y}{a}} = -\frac{\Delta a_x}{\Delta a_y} = -\frac{-2 \cdot 0,04362}{0,24255} \cong 0,35968. \quad (5.4)$$

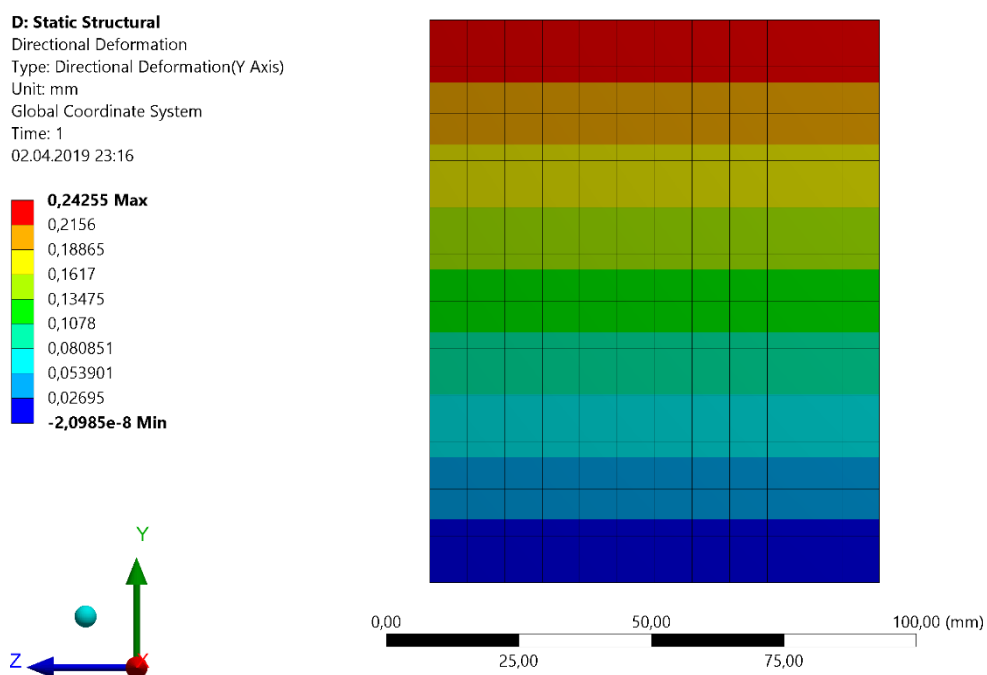
Kde je: F – síla [N],

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení [–],

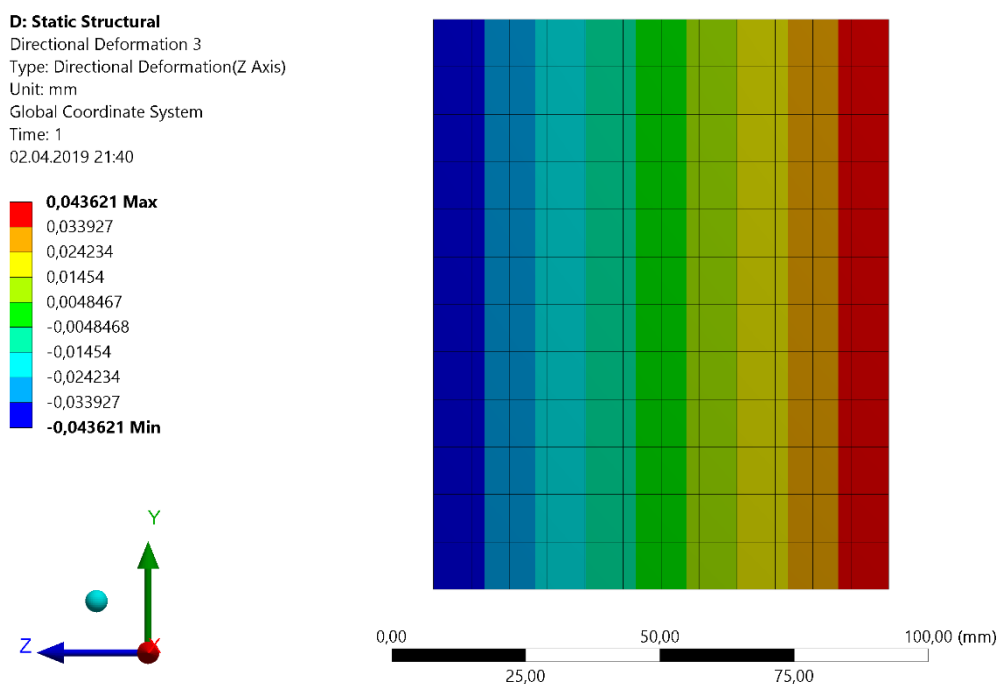
$\varepsilon_x$  – poměrné prodloužení ve směru x (směr kolmý na namáhání) [–],

$\varepsilon_y$  – poměrné prodloužení ve směru y (směr namáhání) [–].

Následně jsem ověřil získané mechanické vlastnosti monolitické struktury. Při aplikaci výše vypočtených mechanických vlastností (5.3) a (5.4) na prostý kvádr stejné velikosti dostávám takřka totožné prodloužení a zúžení.

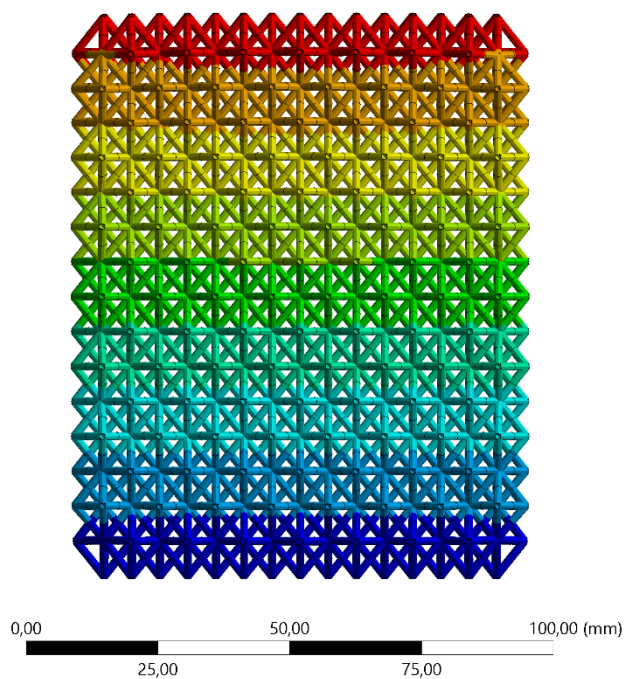
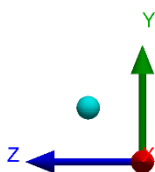
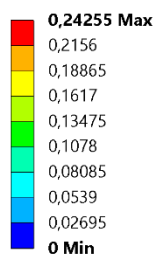


**Obrázek 5.8** – Prodloužení výpočtového modelu kvádru ve směru namáhání



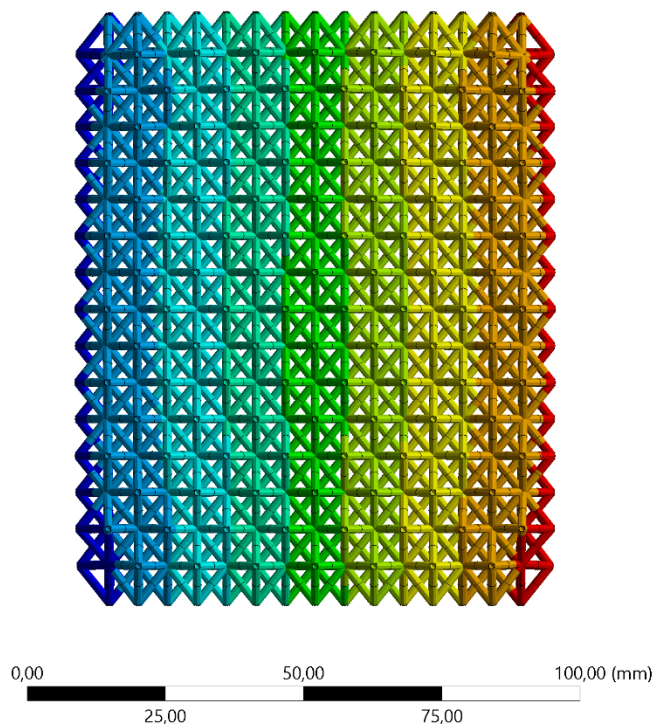
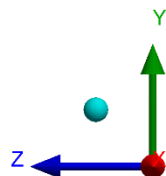
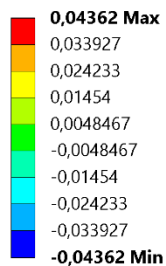
**Obrázek 5.9** – Zúžení výpočtového modelu kvádru ve směru kolmém na namáhání

**C: Static Structural**  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 02.04.2019 22:05



**Obrázek 5.10** – Prodloužení kváдру z tetraedrické mřížky ve směru namáhání

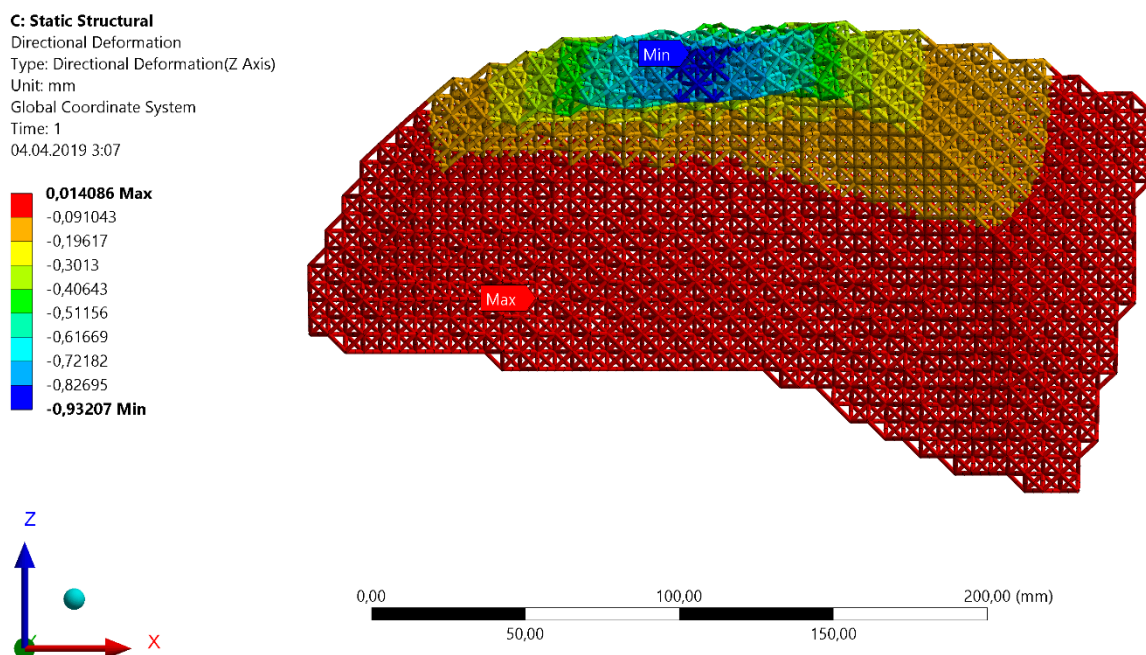
**C: Static Structural**  
 Directional Deformation 3  
 Type: Directional Deformation(Z Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 02.04.2019 21:22



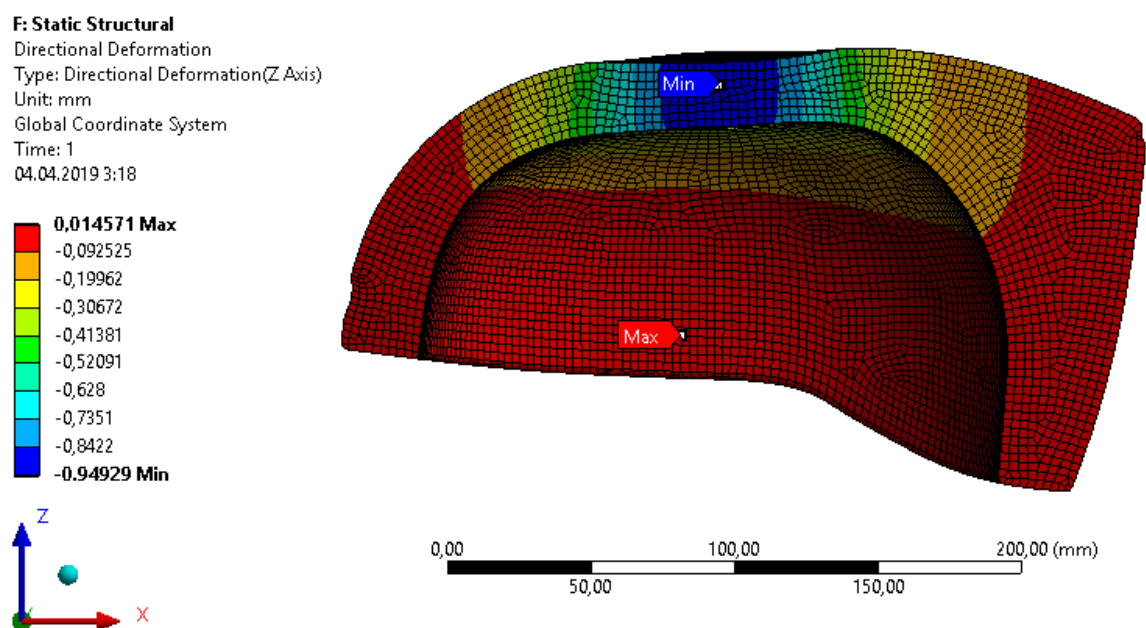
**Obrázek 5.11** – Zúžení kváдру z tetraedrické mřížky ve směru kolmém na namáhání

Vypočtené mechanické vlastnosti (5.3) a (5.4) jsem následně přiřadil výpočtovému modelu (Obrázek 5.13).

Zjednodušení bylo nutné vzhledem k obtížnosti propojení vnitřní struktury s vnější skořepinou. Dále jsem porovnal složitý model vnitřní struktury se strukturou zjednodušenou (výpočtovou).



Obrázek 5.12 – Složitá vnitřní struktura z tetraedrické mřížky



Obrázek 5.13 – Zjednodušený výpočtový model vnitřní struktury

Model znázorněný na Obrázcích 5.12 a 5.13 byl ekvivalentně zatížen silou 500 N a byla s výhodou aplikována symetrie. Je zřejmé, že zjednodušení je zdařilé. Přesto zde existují jistá omezení.

Z designového návrhu na Obrázku 5.5 vyplývá, že vnitřní struktura může lépe kopírovat prilbu. Toho je možno docílit v programu firmy nTopology, kdy je přečnávající mřížka stlačena tak, aby vyplnila daný objem. V blízkosti skořepiny by tudíž byla mřížka mírně hustší, a proto tužší než u výpočtového modelu. Z celkového pohledu je taková vnitřní struktura nehomogenní. Také přechodem na celistvý zjednodušený model předpokládám izotropii – proto není možné řešit DAP. Toho by mohlo být docíleno, pokud by vnitřní struktura měla odlišnou tuhost v různých směrech. Díky tomu by bylo možné zmenšit vliv úhlového zrychlení na mozek.

## 6. Výpočtová analýza nové cyklistické přilby

### 6.1 Materiálové vlastnosti a okrajové podmínky

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [23].

Na zjednodušený model vnitřní struktury byly aplikovány materiálové vlastnosti získané z výpočtu (5.3) a (5.4). Vnější skořepině byly přiřazeny takové materiálové vlastnosti, aby odpovídaly navrženému plastu PA 11.

**Tabulka 6.1** – Materiálové vlastnosti vnitřní struktury

<b>Vnitřní struktura z tetraedrické mřížky a materiálu PA 11</b>	
Youngův modul E	45,551 MPa
Poissonovo číslo $\mu$	0,35968

**Tabulka 6.2** – Materiálové vlastnosti skořepiny [22]

<b>PA 11</b>	
Youngův modul E	1 800 MPa
Poissonovo číslo $\mu$	0,35

Následně byla spojena vnitřní struktura se skořepinou pomocí kontaktu „bonded“. Tento kontakt zamezuje relativním posuvům mezi vnitřní strukturou a vnější skořepinou. Jedná se tedy o pevné spojení.

Okrajové podmínky byly zvoleny tak, aby co možno nejvěrněji napodobovaly experiment Bc. Ondřeje Hurníka [23, str. 36, 37]. V oblasti A jsou odebrány všechny možné posuvy a rotace pomocí vazby „remote displacement“. U oblasti B je situace obdobná s tím rozdílem, že je možný posuv ve směru osy y. Nakonec v nejvyšší části přilby působí síla o velikosti 250 N, pomocí „remote force“. Tato síla je poloviční vzhledem k aplikaci symetrie.



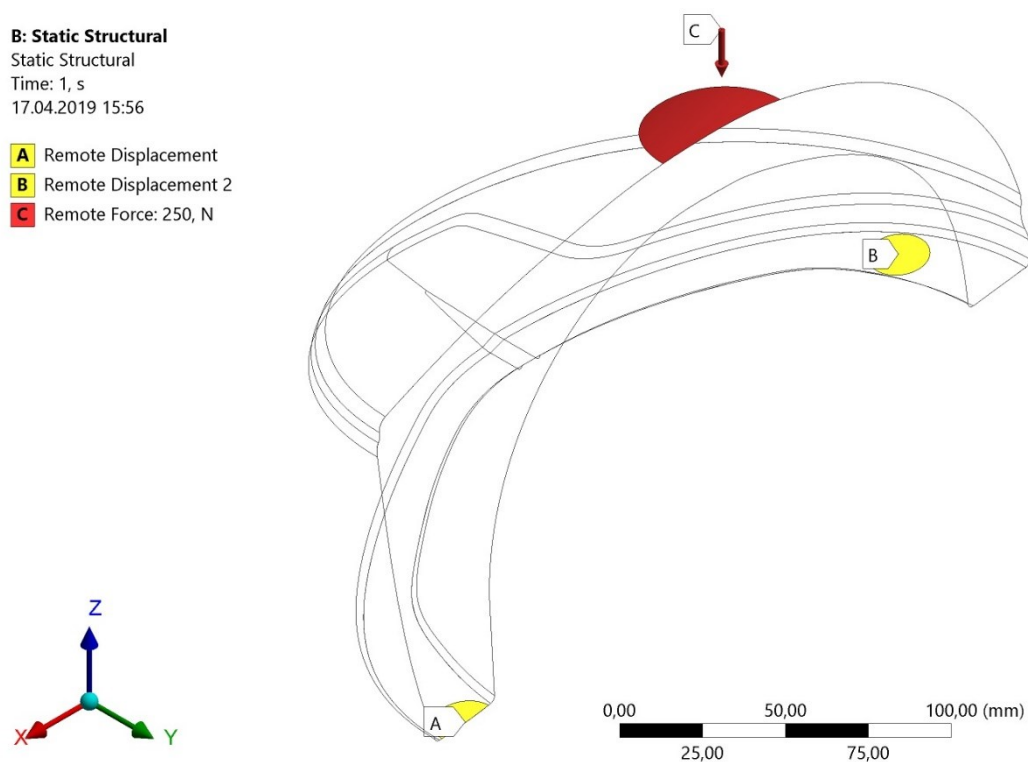
**B: Static Structural**

Static Structural

Time: 1, s

17.04.2019 15:56

- A** Remote Displacement  
**B** Remote Displacement 2  
**C** Remote Force: 250, N

**Obrázek 6.1** – Okrajové podmínky výpočtového modelu nové cyklistické přilby**Tabulka 6.3** – Geometrické okrajové podmínky

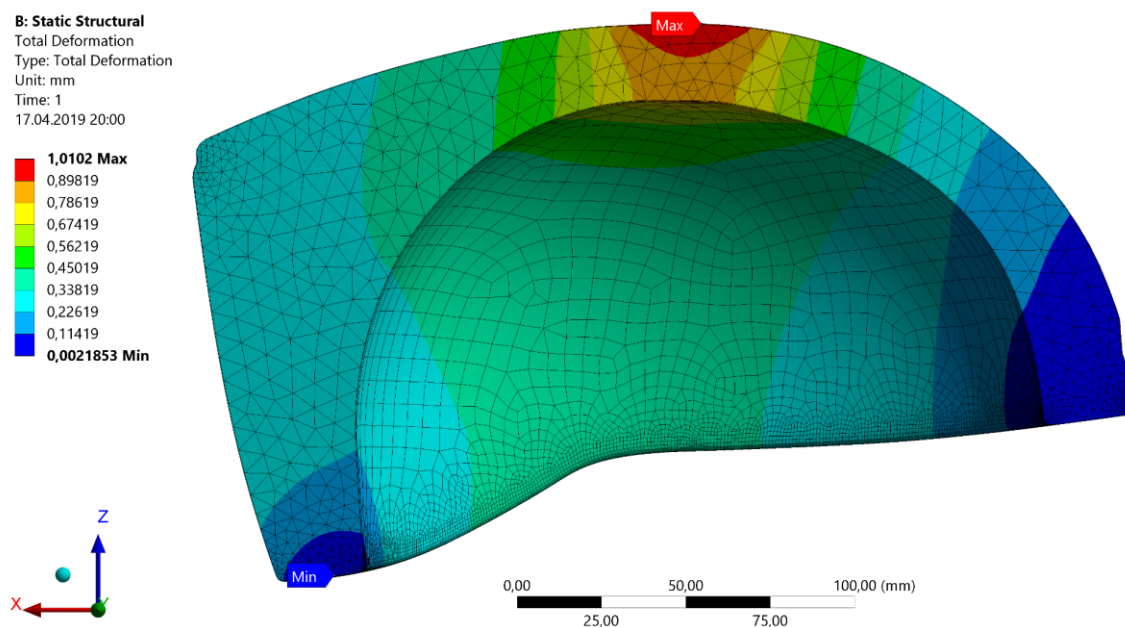
Oblast	Posuv v ose x	Posuv v ose y	Posuv v ose z	Rotace kolem osy x	Rotace kolem osy y	Rotace kolem osy z
A	0	0	0	0	0	0
B	0	libovolný	0	0	0	0

**Tabulka 6.4** – Silové okrajové podmínky

Oblast	Síla ve směru x [N]	Síla ve směru y [N]	Síla ve směru z [N]
C	0	0	-250 N

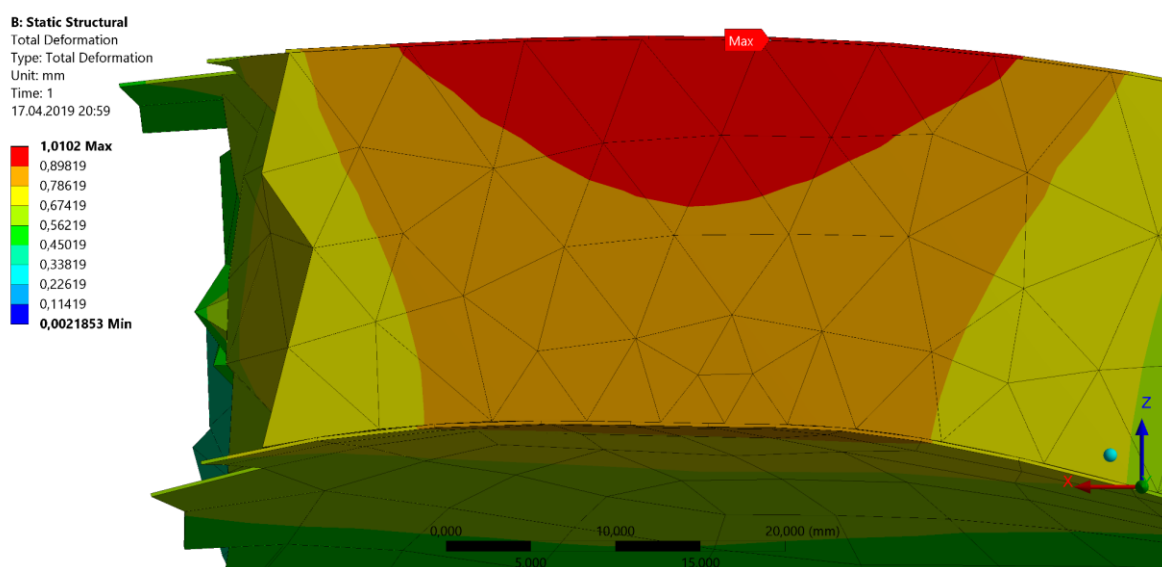
## 6.2 Deformační analýza nové cyklistické přilby

Při aplikaci výše popsaných okrajových podmínek a materiálových vlastností jsou deformační posuvy následující:



Obrázek 6.2 – Deformační posunutí modelu

- největší deformační posuv o přibližné velikosti 1 mm se nachází v místě působení síly,
- naopak nejmenší deformační posuv je v okolí geometrických okrajových podmínek.



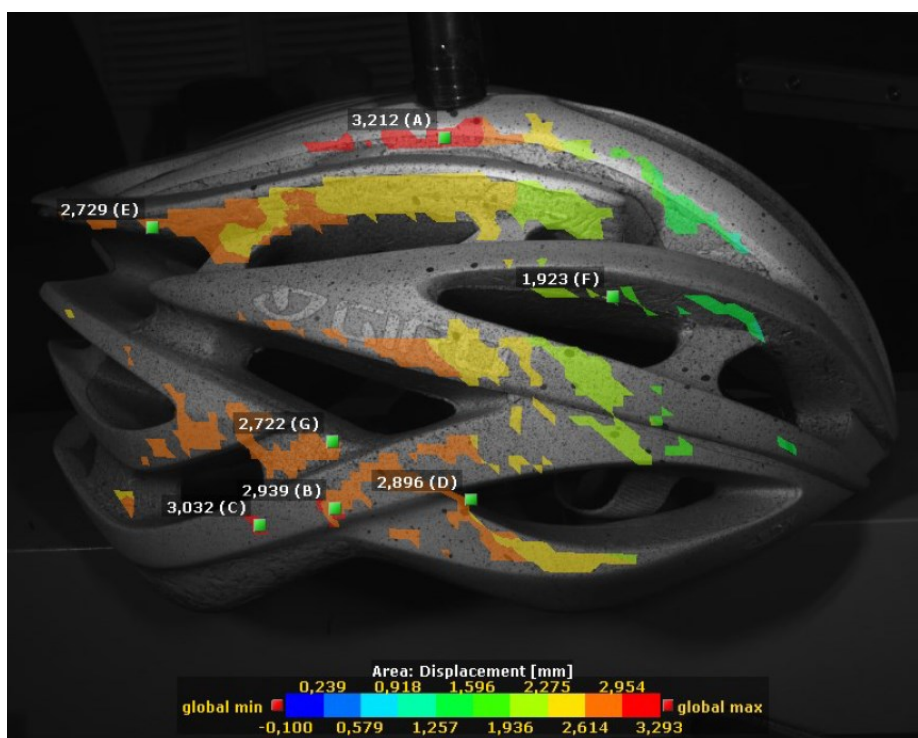
Obrázek 6.3 – Detailní pohled na maximální deformační posunutí modelu

### 6.3 Vyhodnocení deformačního posunutí

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [23].

Z bakalářské práce studenta Bc. Ondřeje Hurníka je známo deformační chování stávající cyklistické přilby. Tyto výsledky byly získány experimentálně metodou korelace digitálního obrazu.

S výhodou jsem použil tyto poznatky k porovnání deformačního chování nové cyklistické přilby.



**Obrázek 6.4** – Deformační posunutí přilby při zatížení 500 N z experimentu Bc. Ondřeje Hurníka [23]

Maximální hodnota deformačního posunutí se v obou případech, jak u experimentu, tak u výpočtového modelu, nachází ve stejném místě. V případě experimentu je maximální hodnota v místě tlačícího válečku přibližně třikrát větší než u výpočtového modelu nové cyklistické přilby. Tuto rozdílnost připisuji hlavně oslabením přilby velkými větracími otvory, jelikož u přileb vyrobených konvenční metodou se jedná o jediný proveditelný způsob odvětrávání.

U nové cyklistické přilby je odvětrávání realizováno pouze průduchy ve skořepině přilby. Samotná vnitřní struktura svojí geometrií umožňuje proudění vzduchu, a proto nemusí být tato nejdůležitější část přilby oslabena.

Samozřejmě rozdílnou deformaci posuvů způsobuje, kromě odlišné geometrie, i jiná volba materiálových vlastností. U experimentu byly určeny následující materiálové vlastnosti.

**Tabulka 6.5** – Materiálové vlastnosti vnitřní pěnové vložky [23, str. 33]

<b>Expandovaný polystyren (EPS)</b>	
Youngův modul E	59 MPa
Poissonovo číslo $\mu$	0,2

**Tabulka 6.6** – Materiálové vlastnosti skořepiny [23, str. 33]

<b>Akrylonitril-butadien-styren (ABS)</b>	
Youngův modul E	3 000 MPa
Poissonovo číslo $\mu$	0,4

**Tabulka 6.7** – Materiálové vlastnosti výztuhy [23, str. 33]

<b>Akrylonitril-butadien-styren (ABS)</b>	
Youngův modul E	181 000 MPa
Poissonovo číslo $\mu$	0,3

Při porovnání materiálových vlastností přilby z experimentu a přilby nového typu by měla být nová přilba poddajnější, což je v rozporu s deformační analýzou uvedenou v Kapitole 6.2. Z tohoto důvodu se domnívám, že trojnásobné deformační posunutí způsobila právě snížená tuhost vlivem velkých větracích otvorů, jak již bylo zmíněno výše.

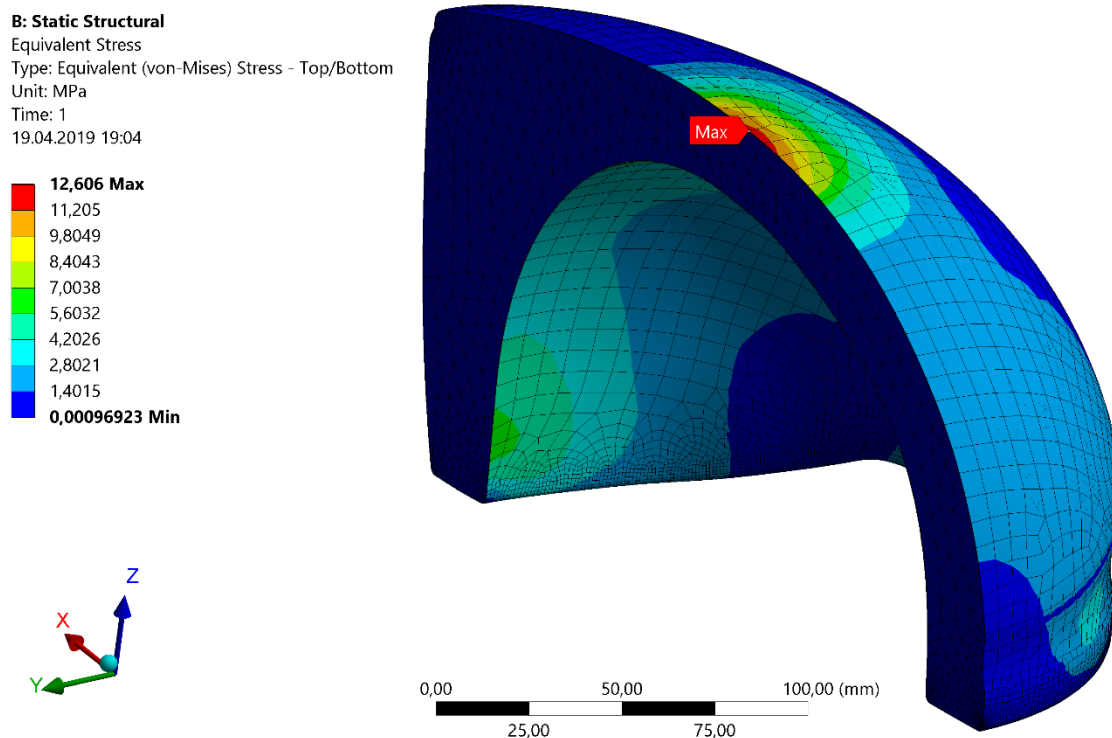
Za zmínku také stojí, že designérem navržená vnitřní struktura má řádově stejný Youngův modul jako expandovaný polystyren (EPS) používaný u cyklistických přileb.

## 6.4 Napěťová analýza nové cyklistické přilby

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [24].

Na výpočtový model jsou aplikovány okrajové podmínky a materiálové vlastnosti popsané v Kapitole 6.1.

V případě skořepiny je největší napětí dle teorie HMH 12,606 MPa v místě aplikace síly.



**Obrázek 6.5** – Napětí ve skořepině dle teorie HMH

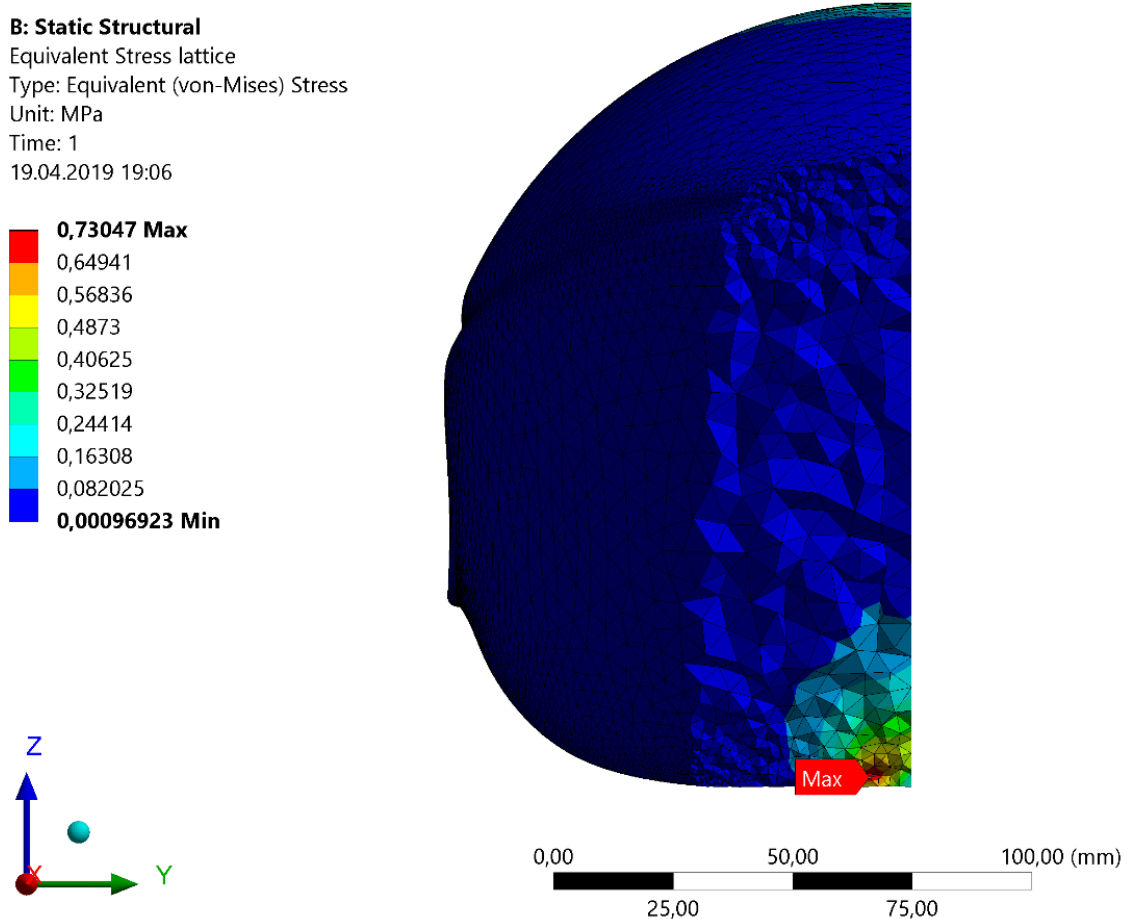
Pro posouzení zjednodušené vnitřní struktury z napěťového hlediska se nabízí více možností dle úrovně diskretizace. Jako nejjednodušší se jeví určení napětí zjednodušeného výpočetního modelu vnitřní struktury a jeho následné vyhodnocení vzhledem k napěťovému chování tetraedrické mřížky.

V případě nahrazení vnitřní zjednodušené struktury tetraedrickou mřížkou z nosníkových prvků by již bylo možné vyhodnotit napětí na konkrétní hraně této mřížky.

Poslední a nejpřesnější řešení je pravděpodobně vymodelování tetraedrické mřížky a její „vysítování“ trojrozměrnými prvky. Díky tomu by bylo možné zjistit i napětí ve spoji určité hrany tetraedrické mřížky se skořepinou přilby.

Vzhledem k funkci přileb považuji první možnost za zcela dostačující. Pokud je přilba podrobena i zkoušce tlumení nárazu, zajímá nás vždy schopnost přetvoření celé oblasti vnitřní struktury při dosažení určitého maximálního přetížení hlavy viz Kapitola 1.2.

Pro demonstraci postupu jsem určil maximální napětí v oblasti okrajové podmínky A, kde jsou odebrány veškeré posuvy a rotace kolem os. Napětí v této oblasti má velikost cca 0,730 MPa.



**Obrázek 6.6** – Napětí uvnitř zjednodušené vnitřní struktury

## 6.5 Vyhodnocení napětí

Požadavky na skořepinu přilby jsou poměrně prosté. Skořepina by měla být dostatečně pevná, aby chránila vnitřní strukturu, a zároveň by nemělo docházet k jejímu praskání.

V případě obdobných okrajových podmínek jako u experimentu Bc. Ondřeje Hurníka bylo ve skořepině vyhodnoceno největší ekvivalentní napětí:

$$\sigma_{\text{red}} = 12,606 \text{ MPa.}$$

V materiálových listech [22] je uvedena mez pevnosti v tahu materiálu PA11:

$$R_m = 50 \text{ MPa.}$$

Bezpečnost skořepiny k meznímu stavu pevnosti tedy je:

$$k = \frac{R_m}{\sigma_{\text{red}}} = \frac{50}{12,606} \cong 3,966 \quad (6.1)$$

V případě vnitřní struktury je situace komplikovanější. Při posuzování schopnosti tlumit náraz je zásadním požadavkem na materiál vnitřní struktury, aby absorboval co možná největší množství energie při využití plastické deformace.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl vyhodnotit napětí vnitřní zjednodušené struktury a porovnat je s dovoleným napětím nezjednodušené tetraedrické mřížky. Domnívám se, že tento postup by byl při rozšíření o plasticitu, uskutečnitelný i v dynamické úloze.

Pro demonstraci postupu bylo určeno jako maximální ekvivalentní napětí vnitřní zjednodušené skořepiny jako:

$$\sigma_{\text{red}} = 0,730 \text{ MPa.}$$



Následně jsem zatížil kvádr z tetraedrické mřížky tak, abych dosáhl mezního stavu pevnosti jednotlivých prvků tetraedrické mřížky z PA 11.

**B: Static Structural**

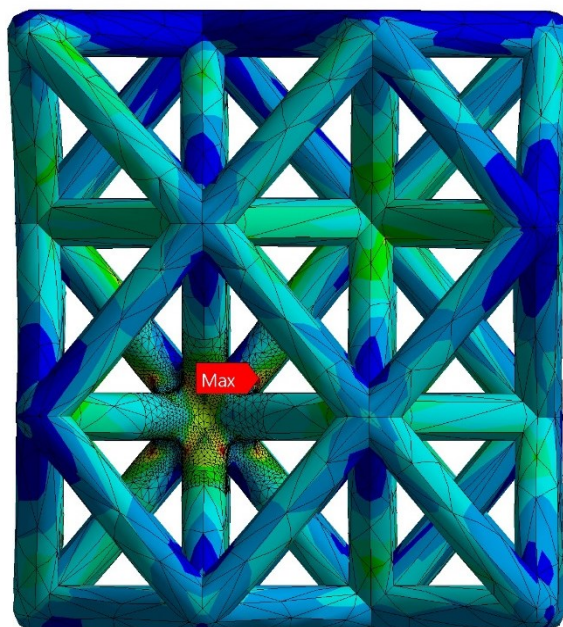
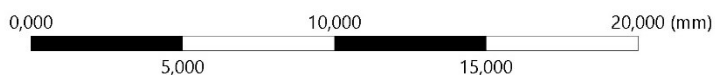
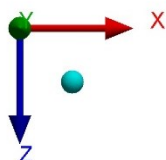
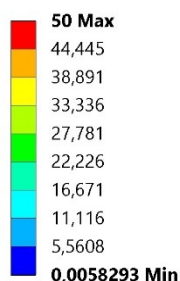
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

23.04.2019 21:41



**Obrázek 6.7 – Maximální možné zatížení tetraedrické mřížky**

**B: Static Structural**

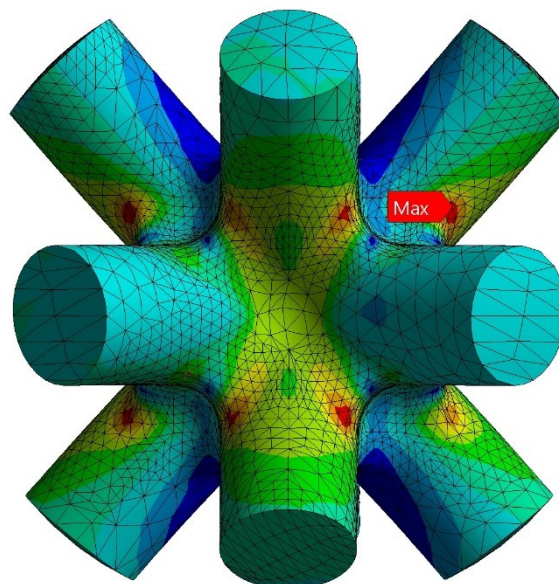
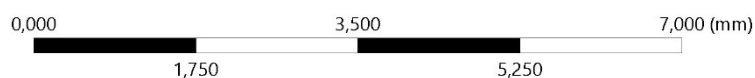
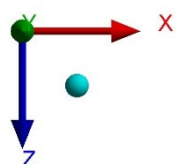
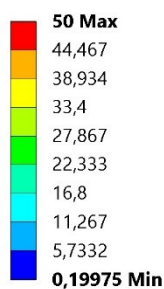
Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

23.04.2019 21:48



**Obrázek 6.8 – Detail maximálního napětí tetraedrické mřížky**



Z jednoduché úvahy jsem vypočetl maximální napětí v tahu pro tetraedrickou mřížku jako celek.

$$G_{\max} = \frac{F}{S} = \frac{470,111}{18,471^2} \cong 1,378 \text{ MPa}, \quad (6.2)$$

Kde je:  $F$  – síla aplikovaná na stěnu kvádrů z tetraedrické mřížky,

$S$  – plocha stěny kvádrů z tetraedrické mřížky.

Bezpečnost k mezi pevnosti tetraedrické mřížky je:

$$k = \frac{G_{\max}}{\sigma_{\text{red}}} = \frac{1,378}{0,730} \cong 1,888$$

Jsem si ovšem vědom nepřesností, kterými je takový výpočet zatížen. Tento postup by pravděpodobně nebyl vhodný k vyhodnocování lokálních koncentrací napětí vlivem blízkosti okrajové podmínky.

Přesto k vyhodnocení napětí ve větší zdeformované oblasti, která vzniká vlivem nárazu, lze tento postup za hodnotově vypovídající. Pro vyvození závěrů z výpočtů by ovšem bylo nutné provést i experimentální srovnání.

## 7. Přibližná hmotnost nové cyklistické přilby

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [20] a [22].

V bakalářské práci Bc. Matěje Martínka je uveden přibližný výpočet hmotnosti nové cyklistické přilby. Pro původní návrh je stanovena přibližná hmotnost přilby 944 g.

Vzhledem k nadměrné hmotnosti jsem se proto rozhodl ke konstrukční úpravě vnější skořepiny.

Objem upravené skořepiny byl stanoven užitím programu Autodesk Inventor Professional jako:

$$V_1 = 37\,527,684 \text{ mm}^3.$$

Objem vnitřní tetraedrické struktury byl stanoven z výpočtu v programu Element

$$V_2 = 458\,977,220 \text{ mm}^3.$$

Dále je z materiálových vlastností [22] známá hustota plastu PA 11 jako:

$$\rho = 1,04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 0,00104 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3}$$

Při uvažování totožných materiálů, jak pro vnější skořepinu, tak pro vnitřní tetraedrickou strukturu, je přibližná celková hmotnost upravené přilby:

$$m = \rho \cdot V = 0,00104 \cdot (37\,527,684 + 458\,977,220) \cong 516 \text{ g} \quad (7.1)$$

Kde je:  $\rho$  – hustota PA 11 [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ],

$V$  – součet objemů vnější skořepiny a vnitřní tetraedrické struktury [ $\text{mm}^{-3}$ ].

Konstrukční úpravou vnější skořepiny se mi tedy povedlo snížit hmotnost přilby o 428 g, tedy přibližně o 45 % z původní váhy.

## 8. Závěr

V této bakalářské práci byly získány poznatky z oblasti konstrukčních, materiálových a technologických řešení stávajících cyklistických přileb. Další důležité poznatky byly získány z českých verzí evropských norem, kterým tyto přilby podléhají. Pro potřeby bakalářské práce byla pozornost věnována hlavně kapitolám věnujícím se stanovení schopnosti přilby tlumit náraz a také metodice vytvoření normovaných maket lidské hlavy. Vzhledem k účelu cyklistických přileb jsou také velice důležité informace z medicínského hlediska, na které jsem byl nasměrován při konzultaci na Traumatologické ambulanci Fakultní nemocnice Ostrava. Z tohoto důvodu byla v bakalářské práci uvedena alespoň krátká rešerše z oblasti kraniocerebrálního poranění.

Získané poznatky z širšího oborového spektra mi byly nápomocny při konstrukční úpravě cyklistické přilby nového typu, jejíž designový návrh vznikl v rámci bakalářské práce Bc. Matěje Martínka ve spolupráci s firmou Invent Medical Group, s. r. o. Konstrukční úpravou skořepiny cyklistické přilby se mi podařilo docílit snížení hmotnosti přilby přibližně o 45 % z původní hmotnosti. Zároveň je úprava provedená tak, aby se tloušťka skořepiny dala jednoduše změnit v případě nevyhovujících výsledků budoucí dynamické zkoušky. K přilbě jsem také následně vymodeloval odpovídající maketu hlavy dle normy ČSN EN 960, podle které byl domodelován vnitřek přilby.

Z konstrukčně upravené cyklistické přilby bylo nutné vytvořit zjednodušený výpočetní model. U skořepiny spočívalo zjednodušení v odstranění větracích otvorů, neboť při diskretizaci modelu s větracími otvory docházelo k překročení povoleného počtu konečných prvků studentské licence programu Ansys. V případě vnitřní tetraedrické struktury byla situace složitější. „Vysítování“ tetraedrické mřížky prostorovými prvky nepřicházelo v úvahu vzhledem k výpočetní náročnosti a licenčnímu omezení. Jako další možnost se jevilo nahrazení prvků tetraedrické sítě malými nosníky. Ani toto řešení nebylo proveditelné kvůli problematickému propojení nosníkových prvků se skořepinou. Jako poslední a úspěšné řešení bylo realizováno přiřazení mechanických vlastností zjednodušené vnitřní struktury tak, aby ekvivalentně nahradila strukturu složitou.

Po úspěšném vytvoření výpočtového modelu cyklistické přilby byla provedena deformační analýza modelu metodou konečných prvků, jejíž výsledky byly porovnány s experimentem. Tento experiment vznikl v rámci bakalářské práce Bc. Ondřeje Hurníka, z níž je mi známo deformační chování stávající cyklistické přilby. Maximální deformační posunutí je v případě experimentu zhruba trojnásobně větší než u cyklistické přilby nového

typu. V obou případech se také maximální deformační posunutí nachází ve stejných místech. Sníženou tuhost experimentální přilby připisují hlavně zeslabení vlivem velkých větracích otvorů. U přileb vyrobených běžnou metodou se jedná o jediný proveditelný způsob odvětrávání. V případě cyklistické přilby nového typu je odvětrávání realizováno pouze průduchy ve skořepině přilby. Samotná vnitřní struktura svojí geometrií umožňuje proudění vzduchu, a proto nemusí být tato nejdůležitější část přilby oslabena. Zajímavé také je, že tetraedrická struktura navržená designérem Bc. Matějem Martínkem má dle mých výpočtů řadově stejný Youngův modul jako Expandovaný polystyren, který byl určen experimentem Bc. Ondřeje Hurníka.

Po vyhodnocení deformačního chování cyklistické přilby následovalo vyhodnocení napětíové. V případě skořepiny bylo stanoveno maximální redukované napětí 12,606 MPa dle teorie HMM, což je hodnota zhruba čtyřnásobně menší než mez pevnosti použitého materiálu. U vnitřní struktury je vyhodnocování napětí v lineární oblasti poněkud diskutabilní. Požadavky na vnitřní strukturu jsou takové, aby byla co nejvíce plasticky deformována při dosažení určitého stanoveného napětí. Přesto byla alespoň rozebrána metodika určení napětí tetraedrické mřížky v lineární oblasti, ačkoliv pro stanovení závěru by bylo nutné i experimentální srovnání.

Nutno také podotknout, že výpočetní modely předpokládají izotropní chování. Z tohoto důvodu nelze řešit DAP. Tuto schopnost ovšem nemají ani běžné cyklistické přilby. Řešení této úlohy také zásadně překračuje rámec zadání této bakalářské práce. Přesto považuji za důležité, aby byla DAP věnována v budoucnu pozornost, pokud mají vznikat bezpečnější sportovní přilby.

Vytvořené modely by však již při dynamické úloze umožnily pohodlně měnit parametry přilby tak, aby splňovala evropské normy, byla lehká a zároveň by ji bylo možné vyrobit na 3D tiskárně.

## 9. Seznam použité literatury

- [01] ZAHRADNÍČEK, Tomáš. *Slovník cizích slov*. TZ-one, 2013. ISBN 978-80-87873-04-05.
- [02] SMRČKA, Martin. *Poranění mozku*. Praha: Grada, 2001. ISBN 80-7169-820-2.
- [03] BRICHTOVÁ, Eva. *Kraniocerebrální poranění v dětském věku*. Praha: Triton, 2008. ISBN 978-80-7387-087-4.
- [04] ČESKO. Zákon č. 361/2000 Sb. ze dne 14. září 2000 o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů (zákon o silničním provozu) ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2000, částka 142, s. 7500. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=4740>
- [05] Cyklistická přilba. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cyklistick%C3%A1\\_p%C5%99ilba&oldid=15419106](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cyklistick%C3%A1_p%C5%99ilba&oldid=15419106)
- [06] BESIP. Používání cyklistické přilby. *Ibesip.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.ibesip.cz/Tematicke-stranky/Aktivni-pohyb-v-silnicnim-provozu/Na-kole/Pouzivani-cyklisticke-prilby>
- [07] GRANTA. Materials for Bicycle Helmets. *Grantadesign.com* [online]. © 2019 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://www.grantadesign.com/resources/materials/casestudies/helmet.htm>
- [08] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. Helmets. *Materials.eng.cam.ac* [online]. © 2019 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/short/OCR/helmets/>
- [09] HIRT, Miroslav a František VOREL. *Soudní lékařství II. díl*. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-271-0268-6.
- [10] ASHBY, M. F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2005, 364(1838) [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2005.1678>
- [11] Lidská hlava. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lidsk%C3%A1\\_hlava&oldid=1402875](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lidsk%C3%A1_hlava&oldid=1402875)

- [12] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 978-80-7196-264-9.
- [13] JUMP SPORT PLUS. Technologie přileb GIRO, BELL, UVEX. *Jumpsport.cz* [online]. © 2019 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://jumpsport.cz/poradna/technologie-prileb-giro-bell-uvex>
- [14] ANCORE. Technologie. *Arcore.cz* [online]. © 2019 [2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.arcore.cz/technologie/>
- [15] MARTINS, Natalie. Kids and Toddler Bike Helmets: How to Choose. *Twowheelingtots.com* [online]. © 2018 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.twowheelingtots.com/how-to-choose-bike-helmets/>
- [16] ČSN EN 960. *Makety hlavy pro zkoušení ochranných přileb*. Praha: Český normalizační institut, 2007. Třídící znak 832140.
- [17] ČSN EN 1078+A1. *Přilby pro cyklisty a pro uživatele skateboardů a kolečkových bruslí*. Praha: Český normalizační institut, 2013. Třídící znak 832166.
- [18] ŠTEFAN, Jiří, Valja KELLEROVÁ a Jiří NEUWIRTH. *Difúzní axonální poranění mozku a jeho diagnostika*. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-0966-5.
- [19] MIPS AB. Technology. *Mipsprotection.com* [online]. © 2019 [2019-03-14]. Dostupné z: <http://mipsprotection.com/technology/>
- [20] MARTÍNEK, Matěj. *Návrh cyklistické SMART přilby*. Ostrava, 2018. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Anna Plchová.
- [21] 3Dees. Termoplastický polyuretan pro 3D tiskárnu HP Jet Fusion. *3dees.cz* [online]. © 2018 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/blog/309-termoplasticky-polyuretan-pro-3d-tiskarnu-hp-jet-fusion>
- [22] 3Dees. HP 3D High Reusability PA 11. *3dees.cz* [online]. © 2018 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/images/pdf/HP-JET-FUSION-PA11-CZ.pdf>
- [23] HURNÍK, Ondřej. *Výpočtová analýza cyklistické přilby*. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Zdeněk Poruba.
- [24] DUCHÁČEK, Jan. *Náuka o pružnosti a pvnosti i. Díl – technická pružnost*. Praha: SNTL, 1957.

## 10. Zvláštní příloha

- CD-ROM s textem práce